



INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE DE TUNISIE

Département Agronomie et Biotechnologie Végétale

PROJET DE FIN D'ÉTUDES DU CYCLE INGENIEUR

Présenté par

Siwar Bassi

Spécialité : Sciences de la production végétale

**Une étude sur la gestion de l'irrigation et son impact sur la
biodiversité dans des oasis Tunisiennes de Kebili**

Devant le jury composé de:

M. Mehri HECHMI	INAT	Président du Jury
M. Mehdi BEN MIMOUN	INAT	Encadrant INAT
M. Guillaume LESTRELIN	CIRAD	Encadrant Profession
M. Karim AOUNALLAH	INAT	Examineur
Mme Nadhira BEN AISSA	INAT	Invitée

A.U : 2023 – 2024

Remerciements

Mes vifs remerciements et hommages s'adressent tout d'abord à Monsieur **Mehdi BEN MIMOUN**, Professeur au département Agronomie et Biotechnologie Végétale à l'Institut National Agronomique de Tunisie, pour avoir aimablement accepté d'encadrer ce travail. Ses orientations, ses conseils et ses remarques ont été très enrichissants. Merci pour votre encadrement, votre patience, votre temps, et pour avoir partagé avec moi votre savoir et votre expérience. Qu'il trouve ici toute l'expression de mon respect et ma reconnaissance.

J'exprime ma reconnaissance à Madame **Nadhira BEN AISSA**, merci de m'avoir accordé votre attention et votre temps, de m'avoir fait bénéficier de votre appui scientifique et académique précieux ainsi que de vos expériences et conseils.

Je remercie également Monsieur **Guillaume LESTRELIN** du CIRAD, pour sa gentillesse et son appui.

Mes remerciements les plus cordiaux s'adressent à Monsieur **Mehri HECHMI**, professeur à l'INAT, pour avoir accepté de présider ce jury, qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **Karim AOUNALLAH**, maître de conférences à l'INAT, qui a accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Un grand merci à **Madame Haïfa BENMOUSSA**, chercheuse à l'INAT, pour son implication et son aide.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers **Madame Ines LAJILI**, ingénieure à Food Quality, pour son aide précieuse qui m'a permis d'affiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent également aux personnels du laboratoire de science du sol de l'INAT et particulièrement à **Mohamed Jeridi**.

J'exprime ma profonde gratitude aux **agriculteurs de la région de l'oasis de Kaabi et de l'oasis de Barghouthia** de m'avoir accueillie chaleureusement pour avoir accordée de leur temps à la réalisation de mes enquêtes et pour leur grande sympathie.

Dédicace

Je veux dédier ce travail à ceux qui m'ont accompagné lors de ce voyage unique.

A mes chers parents **Jamel et Najla**, dont les sacrifices, l'amour inconditionnel, la tendresse et le soutien ont été les piliers de ma réussite académique. Vos encouragements constants et vos prières m'ont donné la force de poursuivre mes études avec détermination. Je vous suis infiniment reconnaissante pour tout ce que vous avez fait pour moi.

A mes meilleures amies, mes chères sœurs **Syrine et Ranim**, qui m'ont comblée de leur amour et leur tendresse tout au long de ce parcours. Votre simple présence me rappelle la chance que j'ai d'être votre sœur. Je vous resterai éternellement reconnaissante, et cela ne sera jamais suffisant.

A mon beau frère **Rafik**, dont les mots d'encouragement et le soutien inébranlables ont été une source d'inspiration pour moi.

A mon cher bureau exécutif, **Rahma, Asma, Eya, Ilef, Hbib et Omar**, vous êtes la famille que je n'aurais jamais pensé avoir besoin. Je vous aime profondément.

A tous mes amis, **Maissa, Eya, Nairouz, Ahmed, Jihed, Haïthem, Mariem, Montassar, Wafa, Atef, Fatma et Youssef**.

A toute la famille **BASSI** et **BEJAOUI**,

Et à toute la famille **INAT Junior Entreprise**.

Avant propos

Cette étude est dans le cadre d'obtention du diplôme d'ingénieur en Sciences de la Production Végétale de l'institut National Agronomique de Tunisie.

Ce travail de Projet de Fin d'études s'inscrit dans le cadre du projet MASSIRE « Innovation Rural et Eau Dans Les Territoires Sud Du Maghreb » financé par FIDA. Ce programme touche des zones oasiennes dans les gouvernorats de Kébili et Médenine. Le projet MASSIRE (2019-2024) vise à renforcer les capacités des acteurs des zones oasiennes et arides du Maghreb pour développer et mettre en œuvre des innovations permettant un développement durable de ces territoires. Pour ce faire le projet compte à :

Identifier, caractériser et tester des innovations techniques et institutionnelles et des pratiques innovantes liées à la gouvernance de l'eau, aux systèmes agricoles et au développement rural ;

Renforcer les capacités des acteurs et les réseaux d'échanges sur ces innovations.

Sommaire

Introduction	1
Partie 1 : Analyse bibliographique	2
Chapitre 1 : Les systèmes oasiens en Tunisie	3
1. Définition d'une oasis	3
2. Importance et fonction des oasis	3
3. Les systèmes oasiens en Tunisie	3
4. Typologie	5
4.1. Classification des oasis tunisiennes selon l'origine géographique	5
4.2. Classification des oasis tunisiennes selon le mode de culture	6
5. Condition climatique	8
Chapitre 2 : Biodiversité et défis du système oasien tunisien	9
1. Différents étages des oasis	9
2. L'effet oasis	12
3. Les défis actuels du système oasien	13
4. Impact de l'eau sur la biodiversité	14
Chapitre 3 : Les ressources en eaux des systèmes oasiens	17
1. Le Continental Intercalaire (CI)	17
2. Le Complexe Terminal (CT)	17
3. Les nappes phréatiques	17
4. Les systèmes d'irrigation dans les oasis	18
4.1. Irrigation de surface	18
4.2. Irrigation localisée	19
5. Paramètres de l'irrigation	20
5.1. Besoin en eau	20
Partie 2 : Matériel et Méthodes	22

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude	23
1. Localisation et caractéristiques de la zone de Kebili	23
2. Conditions climatique de la zone	24
3. Distribution de l'eau d'irrigation dans la région de Kebili	24
Chapitre 2 : Suivi de l'état hydrique et de la gestion de l'irrigation	26
1. Les sondes capacitives	26
2. Collecte et analyse de données	26
3. Estimation de la quantité d'eau disponible à la plante.....	28
Chapitre 3 : Caractérisation du microclimat oasien	30
1. Les stations météo.....	30
2. Estimation des quantités de chaleur accumulées	30
3. Estimation des portions de froid disponibles par le modèle dynamique	31
Chapitre 4 : Enquêtes et diagnostic participatifs	Error! Bookmark not defined.
1. Définition de l'approche participative	Error! Bookmark not defined.
2. Outils d'investigation.....	Error! Bookmark not defined.
Partie 3 : Résultats et discussion	33
Chapitre 1 : Evaluation des données de l'irrigation	34
1. L'Oasis de Barghouthia	34
1.1 Stratégie du GDA	34
1.2 Parcelle à un seul étage à Barghouthia : Massire 1	34
1.3 Suivi de l'état hydrique de la parcelle Massire 1	37
1.4 Parcelle à trois étages à Barghouthia : Massire 2.....	43
1.4. Suivi de l'état hydrique de la parcelle Massire 2	45
2. L'Oasis de Kaabi	52
2.1 Stratégie du GDA Kaabi	52
2.2 Parcelle à un seul étage Kaabi 1	53

2.3. Suivi de l'état hydrique de la parcelle Kaabi 1	55
2.4 Parcelle à un seul étage à El Kaabi 2	60
2.5. Suivi de l'état hydrique de la parcelle Kaabi 2	61
3. Suivi de la conductivité électrique du sol	65
Chapitre 2 : Caractérisation du microclimat oasien	69
1. Température.....	70
1.1 La température moyenne	70
1.2. Accumulation des quantités de chaleur	72
1.3. Estimation des portions de froid	73
2. L'humidité relative	75
3. Cas des journées à températures extrêmes.	76
4. Vitesse du vent	79
4.1. Vitesse du vent moyen.....	79
4.2. Vitesse du vent rafale.....	80
Conclusion et perspectives	86
Références Bibliographiques.....	87

Liste des tableaux

Tableau 1: Evolution des oasis tunisiennes par Gouvernorat de entre les années 2013 et 2019 (DGEDA agridata.tn 2019).	4
Tableau 2: Calendrier d'irrigation de palmier dattier adulotes productifs en fonction des localités (Sedra, 2003).	21
Tableau 3: Caractéristique de la rétention d'eau du sol de Massire 1	36
Tableau 4: Nombre des irrigations et les tours d'eau en fonction des stades phénologique du palmier dattier sur la parcelle Massire 1.....	42
Tableau 5: Caractéristique de la rétention d'eau du sol de Massire 2	45
Tableau 6 : Nombre des irrigations et les tours d'eau en fonction des stades phénologique du palmier dattier sur la parcelle Massire 2.....	51
Tableau 7: Caractéristiques de la rétention d'eau du sol de Kaabi 1.	55
Tableau 8: Nombre des irrigations et les tours d'eau en fonction des stades phénologique du palmier dattier sur la parcelle Kaabi 1.....	59
Tableau 9:Caractéristiques de la rétention d'eau du sol de Kaabi 2.	61
Tableau 10: Nombre des irrigations et les tours d'eau en fonction des stades phénologique du palmier dattier sur la parcelle Kaabi 2.....	64
Tableau 11: Les mesures de la conductivité électrique du sol dans les parcelle de l' oasis d'El Barghouthia (du 01-11-2021 jusqu'au 06-04-2024) et les parcelle de l'oasis d'El Kaabi (du 01-03-2024 jusqu'au 09-04-2024)	68

Liste des figures

Figure 1: Répartition des oasis par gouvernorat et par typologie (Labidi, 2019).	4
Figure 2: Carte de situation géographique des principaux types d'oasis en Tunisie (Sghaier, 2010).....	5
Figure 3: Typologie des oasis tunisiennes par origine géographique (situation en 2009) (Sghaier, 2010)	6
Figure 4 : Une oasis traditionnelle.	7
Figure 5: Une oasis moderne.....	8
Figure 6: Une Oasis traditionnelle à 3 étages : palmiers dattiers, arbres fruitiers et fourrage (Santoro et al., 2020).	10
Figure 7: Variation des fréquences d'irrigation dans les oasis de Kebili (Aljane et al.,2020) .	15
Figure 8: Lien entre la fréquence d'irrigation et (A) le nombre d'étages dans les parcelles oasisiennes ou (B) le nombre d'espèces cultivées avec le palmier dattier (Benmoussa et al., 2022).....	16
Figure 9: Carte administrative des délégations de gouvernorat de Kebili (Gouvernorat de Kebili en chiffres, 2021).....	23
Figure 10: Répartition de la source de l'eau d'irrigation dans les oasis de Kebili (Aljane et al., 2020).....	25
Figure 11: Image satellitaire de l'emplacement des sondes capacitives; A: Les sondes d'El Barghouthia; B: Les sondes d'El Kaabi.	27
Figure 12: Plateforme Food Quality pour le suivi des paramètres des sondes capacitives.....	28
Figure 13: Image satellitaire de l'emplacement des stations météo..	30
Figure 14: Parcelle d'un seul étage à El Bargouthia.....	35
Figure 15: Le système d'irrigation de la parcelle à un seul étage; A: Sillon liant deux palmiers dattiers du même cuve; B: Schématisation du flux de l'eau d'irrigation au sein de la parcelle.	35
Figure 16: Puits privé sur la parcelle d'un seul étage à El Barghouthia.	36
Figure 17: Courbe des irrigations de la parcelle Massire 1 d'El Barghouthia pour la période du 01-11-2021 jusqu'au 06-04-2024.	37
Figure 18: Nombre d'irrigations en chaque mois des années 2022- 2023- 2024 de Massire 1.	38

Figure 19: Exemple de l'évolution de l'humidité du sol pour 6 profondeurs après une irrigation le 24/12/2023 (Parcelle Massire 1).....	39
Figure 20: Evolution de l'humidité lors de l'irrigation du 04 /02/2023 sur les 6 profondeurs du sol ; A : Etat du sol au moment du déclenchement de l'irrigation ; B : Etat du sol au moment du début de la sur-irrigation ; C : Etat du sol à l'arrêt de l'irrigation.....	40
Figure 21: Les irrigations mois d'août 2023 (Parcelle Massire1).....	41
Figure 22: Parcelle de trois étages de l'oasis d'El Barghouthia.	43
Figure 23: Système d'irrigation en cuve individuelle ineterconnectées par des scillons dans la parcelle à trois étages.....	44
Figure 24: Les deux puits privés de la parcelle à trois étages.	44
Figure 25: Courbe des irrigations de la parcelle Massire 2 d'El Barghouthia pour la période du 01-11-2021 jusqu'au 06-04-2024.	46
Figure 26: Nombre d'irrigations en chaque mois des années 2022- 2023- 2024 de Massire 2.....	47
Figure 27: Evolution de l'humidité du sol pour 6 profondeurs après une irrigation du 28/02/2024 au sein de la parcelle Massire 2.....	48
Figure 28: Evolution de l'humidité lors d'une irrigation le 04 /07/2023 sur les 6 profondeurs du sol ; A : Etat du sol au moment du déclenchement de l'irrigation ; B : Etat du sol au moment du début de la saturation ; C : Etat du sol à l'arrêt de l'irrigation	49
Figure 29:Les irrigations pendant la période du 20/08/2023 jusqu'au 14/10/2023 au sein de la parcelle Massire 2.....	50
Figure 30 : La répartition de l'oasis d'El Kaabi par secteurs.	53
Figure 31: A : La parcelle à un étage Kaabi 1 ; B : Emplacement de la sonde capacitive dans la parcelle Kaabi 1.	54
Figure 32 : Courbe des irrigations de la parcelle Kaabi 1 pour la période du 09-03-2023 jusqu'au 06-04-2024.....	55
Figure 33: Nombre d'irrigations en chaque mois des années 2023- 2024 de Kaabi 1	56
Figure 34: L'humidité du sol montrant une remonté de la nappe au sein de la parcelle Kaabi 1.	57
Figure 35: Evolution de l'humidité lors d'une irrigation le 08 /03/2024 sur les 6 profondeurs du sol ; A : Etat du sol au moment du déclenchement de l'irrigation ; B : Etat du sol au moment du début de la saturation ; C : Etat du sol à l'arrêt de l'irrigation	58
Figure 36: La parcelle d'El Kaabi 2.....	60

Figure 37: Courbe des irrigations de la deuxième parcelle d'El Kaabi pour la période du 09-03-2023 jusqu'au 06-04-2024.	61
Figure 38: Nombre d'irrigations en chaque mois des années 2023- 2024 de Kaabi 2	62
Figure 39: Cas de l'irrigation du 31/01/2024 au sein de la parcelle Kaabi 2.....	63
Figure 40: Evolution de la conductivité électrique sur les 6 niveaux du sol pendant la période d'étude du 01/11/2021 jusqu'au 06/04/2024 de la parcelle de Barghouthia Massire 1.	65
Figure 41: Evolution de la température du sol sur les 6 niveaux du sol pendant la période d'étude du 01/11/2021 jusqu'au 06/04/2024 de la parcelle de Barghouthia Massire 1.	66
Figure 42 : A: Station météo Massire 1; B: Station météo Massire 2.....	69
Figure 43: Evolutions des températures journalières moyennes au sein des deux parcelles ...	70
Figure 44: La variation des températures pendant les années 2021-2022-2023-2024.....	71
Figure 45: Evolution de la somme des températures chaudes (GDH) dans les deux parcelles	72
Figure 46: Evolution de l'accumulation des portions de froid au sein des deux parcelles pour la période du 01/10/2021 au 31/03/2022, selon le modèle dynamique	73
Figure 47 : Evolution de l'accumulation des portions de froid au sein des deux parcelles pour la période du 18/11/2022 au 31/03/2023, selon le modèle dynamique	74
Figure 48: Variation de l'humidité relative journalière moyenne au sein des deux oasis.....	75
Figure 49: Courbe de la différence de l'humidité relative entre la parcelle à trois étages et la parcelle à un étage.	76
Figure 50: Variation de la température et de l'humidité relative durant la journée la plus chaude (29-07-2023) ; T°1: Température de la parcelle à un étage; T° 2: Température de la parcelle à trois étages; HR 1: Humidité relative de la parcelle à un étage; HR 2: Humidité relative de la parcelle à trois étages.....	77
Figure 51: Variation de la température et de l'humidité relative durant la journée la plus froide (21-01-2022) ; T°1: Température de la parcelle à un étage; T° 2: Température de la parcelle à trois étages; HR 1: Humidité relative de la parcelle à un étage; HR 2.	78
Figure 52: Variation de la vitesse moyenne du vent moyen au sein des deux parcelles	79
Figure 53: Variation du vent moyen au sein des deux oasis pour le 08-05-2023	80
Figure 54: Variation de la vitesse moyenne du vent rafale dans les deux parcelles	80
Figure 55: Variation du vent rafale au sein des deux parcelles pour le 08-05-2023	81

Liste des abréviations

CC : Capacité au champ

CE : Conductivité Electrique

CP : Chill Portion

GDA : Groupement de développement agricole

GDH : Growth Degree Hour

Pfp : point de flétrissement permanent

PPI : Périmètre Publique Irrigué

RU : Réserve Utile

RFU : Réserve Facilement Utilisable

S_i : Stock initial

S_f : Stock final

STEG : Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz

Résumé

Ce travail vise à examiner la gestion de l'eau dans les oasis de Kebili en mettant l'accent sur l'adaptation des pratiques d'irrigation face à la diminution progressive de cette ressource. L'objectif est d'évaluer les différentes stratégies de gestion et leur impact sur la biodiversité oasienne. Des sondes capacitatives ont été installées chez 4 agriculteurs dans la région de Kebili avec des parcelles qui présentent des caractéristiques différentes, ainsi que 2 stations météo dans 2 des parcelles de ces agriculteurs. Les analyses de données enregistrées ont révélé des différences significatives dans la gestion des eaux d'irrigation des 4 parcelles. Ces stratégies dépendent de la présence ou l'absence d'une autre source d'eau. Cependant, cette autonomie ne garantit pas toujours une gestion optimale de l'irrigation et de la structure de la parcelle. Des irrégularités dans la fréquence et les quantités d'eau apportées ont conduit à des problèmes de saturation des sols et de salinisation, menaçant ainsi la qualité des sols et la productivité des cultures. En particulier, la parcelle à trois étages présente des avantages en termes de microclimat, créant un environnement favorable au développement et à la croissance des cultures. Pour améliorer la gestion de l'irrigation et protéger la biodiversité oasienne, il est recommandé d'avoir des tours d'eau réguliers et adaptés aux calendriers culturels des plantes, et d'introduire des cultures de différents étages.

Mot clé : Oasis, Gestion de l'irrigation, Tour d'eau, Biodiversité oasienne, Microclimat, Effet oasis.

Abstract

The aim of this study is to examine water management in the Kebili oases, focusing on the adaptation of irrigation practices in the face of the gradual decline in this resource. The aim is to assess the different management strategies and their impact on oasis biodiversity. Capacitive probes were installed at the homes of 4 farmers in the Kebili region, on plots with different characteristics, along with 2 weather stations on the sites of 2 of these farmers. Analysis of the recorded data revealed significant differences in irrigation water management on the 4 plots. These strategies depend on the presence or absence of another source of water. However, this autonomy does not always guarantee optimal irrigation management. Irregularities in the frequency and quantity of water supplied have led to problems of soil saturation and salinisation, threatening soil quality and crop productivity. In particular, the three-structured plot offers advantages in terms of microclimate, creating a favourable environment for crop development and growth. To improve irrigation management and protect oasis biodiversity, it is recommended to have regular water turns that are adapted to the plants' cropping calendars, and to introduce crops from different levels.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة إدارة المياه في واحات قبلي، مع التركيز على تكيف ممارسات الري في مواجهة الانخفاض التدريجي في هذا المورد. والهدف هو تقييم استراتيجيات الإدارة المختلفة وتأثيرها على التنوع البيولوجي في الواحات. تم تركيب مجسات سعوية في اراضي 4 مزارعين في منطقة قبلي على قطع أراضي ذات خصائص مختلفة، إلى جانب محطتين للطقس في اراضي اثنين من هؤلاء المزارعين. وكشف تحليل البيانات المسجلة عن وجود اختلافات كبيرة في إدارة مياه الري في قطع الأراضي الأربع. وتعتمد هذه الاستراتيجيات على وجود أو عدم وجود مصدر آخر للمياه. غير أن هذه الاستقلالية لا تضمن دائمًا الإدارة المثلى لمياه الري. فقد أدى عدم الانتظام في تواتر وكمية المياه الموردة إلى مشاكل تشبع التربة وتملحها، مما يهدد جودة التربة وإنتاجية المحاصيل. وعلى وجه الخصوص، توفر قطعة الأرض المكونة من ثلاثة طوابق مزايا من حيث المناخ المحلي، مما يخلق بيئة مواتية لتنمية المحاصيل ونموها. ولتحسين إدارة الري وحماية التنوع البيولوجي للواحة، يوصى بإجراء مناوبات منتظمة للمياه تتكيف مع التقويمات الزراعية للنباتات، وإدخال محاصيل من مستويات مختلفة.

Introduction

La survie des oasis, qui se trouvent souvent dans des territoires arides, est fortement liée à la maîtrise de l'eau. Cette gestion peut s'opérer de diverses manières, que ce soit par la dérivation d'eau depuis des cours d'eau, comme observé dans la vallée du Nil en Égypte, ou par le pompage des nappes souterraines, une pratique courante dans les oasis tunisienne.. D'autres méthodes, telles que le drainage au moyen de galeries souterraines, sont également employées, comme c'est le cas avec les Khetaras du Sud marocain, les foggaras d'Algérie, ou les qanâts d'Iran. (Jouve, 2012). Parallèlement, la rareté croissante de l'eau à l'échelle mondiale, accentuée par des perspectives de pénuries futures, nécessite une gestion plus efficiente de cette ressource vitale.

Dans ce contexte, les oasis tunisiennes du Djérid, du Nefzaoua ou de Kebili font face à des pressions croissantes sur leurs ressources en eau, aggravées par des sécheresses récurrentes. La conscience de la rareté des ressources hydriques incite à une économie d'eau plus attentive, soulignant l'importance de concepts modernes de gestion de la demande et de valorisation économique de l'eau. Cette évolution vers des pratiques plus rationnelles vise à orienter les agriculteurs vers une gestion plus efficace des ressources rares, tout en préservant la biodiversité propre aux oasis, souvent composée de plantes adaptées à des conditions spécifiques.

Cependant, le défi réside dans l'harmonisation entre les savoirs traditionnels, l'évolution des pratiques de gestion de l'eau et la préservation de la biodiversité oasisienne. La déficience en eau, si elle n'est pas gérée de manière durable, risque de compromettre l'équilibre écologique fragile des oasis, menaçant la diversité biologique unique de ces écosystèmes. Ainsi, la problématique centrale de cette étude réside dans la recherche d'une gouvernance de l'eau qui intègre efficacement les aspects traditionnels, contemporains et environnementaux, tout en minimisant l'impact potentiel de la déficience en eau sur la biodiversité oasisienne.

Partie 1 : Analyse bibliographique

Chapitre 1 : Les systèmes oasiens en Tunisie

1. Définition d'une oasis

Les oasis représentent des écosystèmes localisés dans des régions désertiques, souvent autour d'une source d'eau ou dans des dépressions où les nappes phréatiques sont proches de la surface (Labidi, 2019). Ils se définissent comme des zones aménagées et cultivées sur des étendues arides, voir désertiques, et sont répartis à l'échelle mondiale dans diverses régions sèches, notamment autour du Sahara, au Maghreb, dans le Sahel, au Moyen-Orient, le long de la côte ouest de l'Amérique latine, ainsi qu'en Asie centrale. L'installation de l'oasis est souvent basée sur la culture de palmier dattier, qui est l'espèce pivot de cet espace de culture et qui procréé un microclimat favorable pour le développement d'autres cultures (Jouve, 2012).

2. Importance et fonction des oasis

L'oasis constitue le pivot de la pratique agricole dans les régions arides, comptant au moins 50% de la population locale qui dépende de l'activité oasienne (Kadri et Van Ranst, 2002). Ces écosystèmes représentent une richesse floristique et faunistique où des cultivars locaux adaptés aux conditions du milieu sont maintenus et exploités (Sghaier, 2010). Selon Kassah (2009), les oasis se caractérisent de plusieurs fonctions : fonction agricole ou productive, fonction stratégique ou territoriale, fonction récréative ou touristique et fonction symbolique ou culturelle.

3. Les systèmes oasiens en Tunisie

En 2015, la monographie des oasis des gouvernorats de Kebili, Tozeur, Gafsa et Gabes a identifié un total de 267 oasis. Cette classification comprenait 141 oasis modernes et 126 oasis traditionnelles. Il est à noter que la majorité des oasis modernes (135 sur 141) sont concentrées dans les gouvernorats de Kebili et Tozeur, tandis que seulement 6 oasis sont situées dans le gouvernorat de Gafsa, et aucune dans le gouvernorat de Gabes (Figure 1). La distribution inégale des oasis modernes souligne les défis potentiels liés à la situation instable dans les régions concernées (Labidi, 2019).

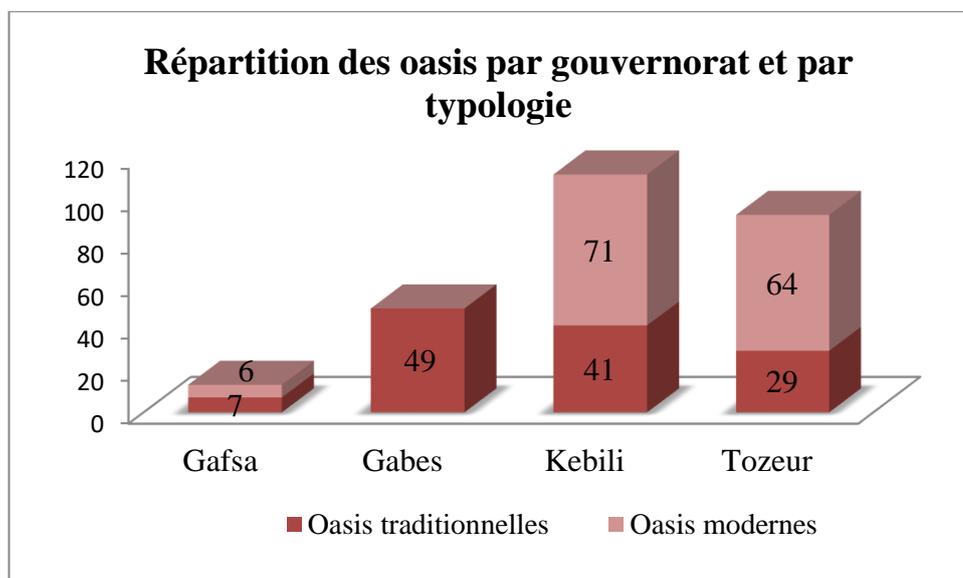


Figure 1: Répartition des oasis par gouvernorat et par typologie (Labidi, 2019).

Selon le tableau 1, le gouvernorat de Kebili a enregistré le taux d'accroissement le plus élevé. Cette expansion est attribuée à l'extension des superficies en dehors des périmètres publics irrigués (PPI), réalisée par des initiatives privées de promoteurs oasiens. Ces extensions, qualifiées « d'illicites », résultent de l'élargissement des superficies sans autorisation préalable pour l'accès à l'eau par le creusage de forages. L'importante augmentation des superficies enregistrées est révélatrice de l'importante dynamique dans la création de nouvelles exploitations de palmier dattier.

Tableau 1: Evolution des oasis tunisiennes par Gouvernorat de entre les années 2013 et 2019 (DGEDA agridata.tn 2019).

Oasis	Kebili	Tozeur	Gafsa	Gabes	Total
Superficie (ha) 2013	23858	8363	2052	6703	40976
Superficie (ha) 2019	36560	8444	4325	7325	56654
Différence des superficies	12702	81	2273	622	15678

4. Typologie

La classification des systèmes oasiens tunisiens peut se baser sur la situation géographique, les modes de culture et de gestion, l'accès à l'eau, ainsi que les pratiques culturelles.

4.1. Classification des oasis tunisiennes selon l'origine géographique

Selon l'origine géographique, les oasis tunisiennes sont classées en deux grands ensembles : oasis continentales et oasis littorales. Ces oasis sont réparties sur le sud tunisien comme le montre la Figure 2.

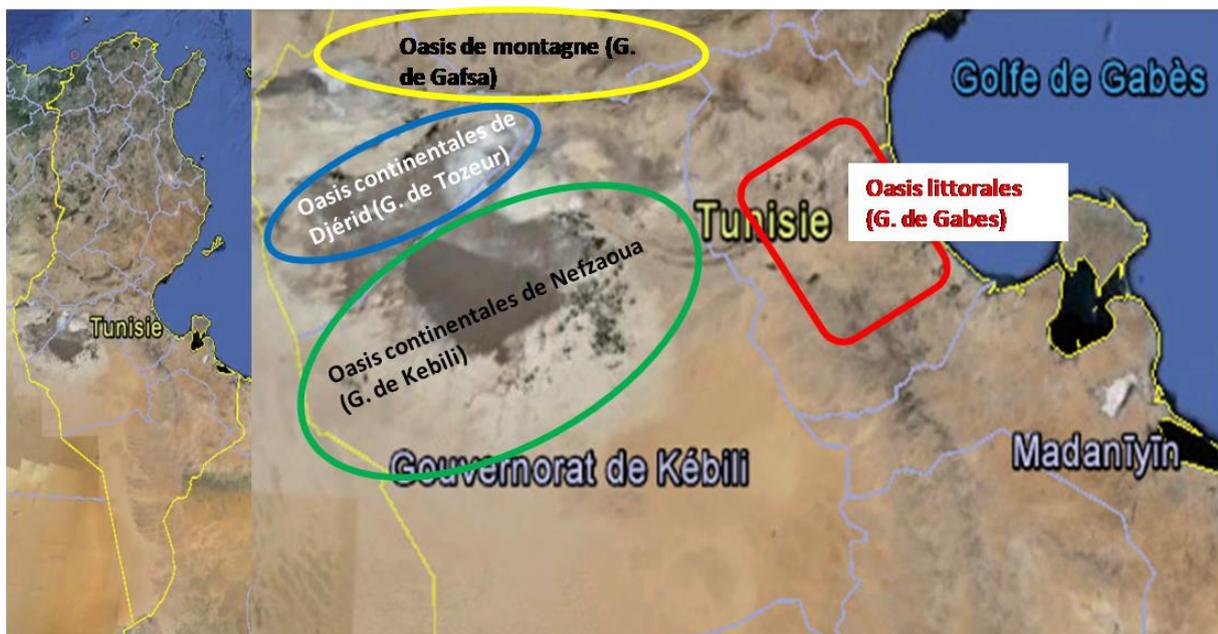


Figure 2: Carte de situation géographique des principaux types d'oasis en Tunisie (Sghaier, 2010)

- ❖ **Les oasis continentales** qui prédomine avec 33723 ha soit 83% de l'ensemble des oasis. Ces oasis se répartissent elles-mêmes en oasis sahariennes et oasis de Montagnes.
- ✓ En 2009, les oasis sahariennes, englobant 31 343 hectares, soit 76% des oasis tunisiennes, se situent principalement dans la région de Tozeur (Région du Djérid) au nord, couvrant 8 363 hectares, soit 20%, et dans la région de Kébili avec 22 980 hectares, soit 57%. Ces oasis sahariennes se caractérisent par un climat marqué par des températures élevées et une

atmosphère sèche, avec une prédominance de la variété Déglet Nour (Sghaier, 2010).

- ✓ Les oasis de montagnes sont concentrées dans la région de Gafsa, représentant 2 380 hectares, soit 6% de la superficie totale des oasis. Elles se caractérisent par un hiver doux et la prédominance de variétés communes (Sghaier, 2010).
- ❖ **Les oasis littorales** se localisent principalement dans la région de Gabès, couvrant 7080 hectares, soit 15% de l'ensemble des oasis, et abritant 10% de l'effectif total des palmiers. La culture du palmier dattier dans cette région est représentée par des variétés telles que Bouhattem, Lemsi, Arichti, et d'autres variétés communes, contribuant à 16% de la production nationale.

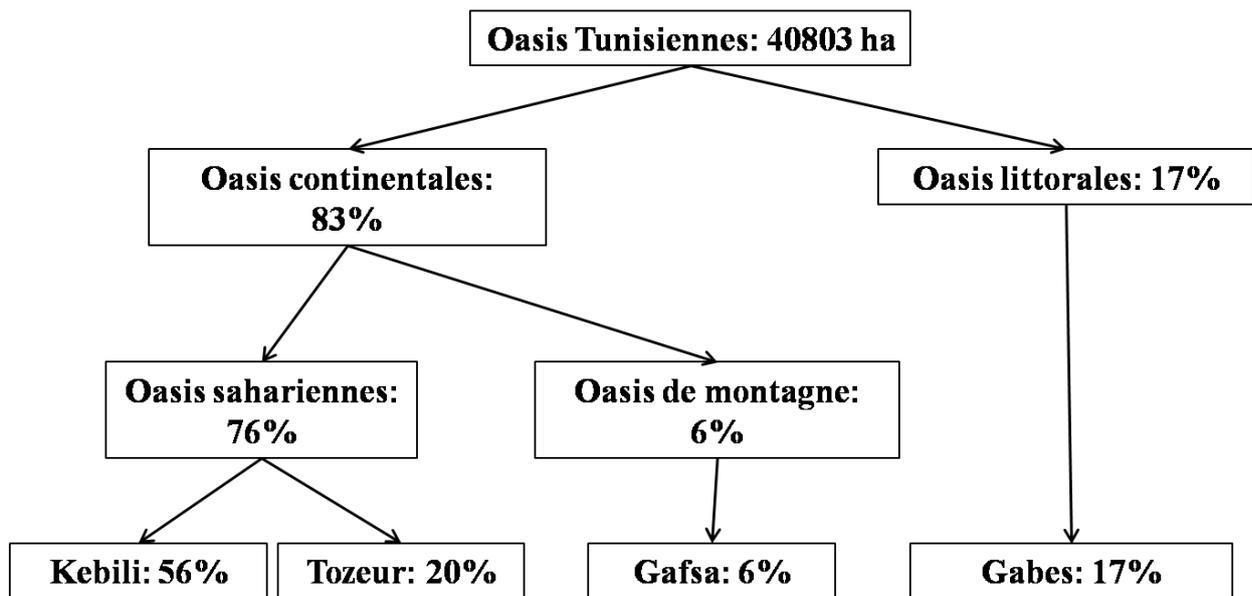


Figure 3: Typologie des oasis tunisiennes par origine géographique (situation en 2009) (Sghaier, 2010)

4.2. Classification des oasis tunisiennes selon le mode de culture

La catégorisation des oasis selon leurs modes de culture permet de distinguer deux types : les oasis traditionnelles et les oasis modernes. Il convient de noter que cette classification ne suggère pas nécessairement que la modernité d'une oasis est conditionnée par

son ancienneté. En effet, une oasis ancienne peut présenter les caractéristiques inhérentes à une oasis moderne (Sghaier, 2010).

❖ Les oasis traditionnelles

Dans le cadre des exploitations traditionnelles (Figure 4), des caractéristiques distinctives se dégagent, comprenant notamment un morcellement significatif des propriétés agricoles, une diversité de variétés de palmiers dattiers, une densité de palmiers dépassant les 150 arbres par hectare, l'absence d'un plan de plantation régulier, la coexistence fréquente d'autres cultures au sein de l'oasis, ainsi que des rendements annuels modestes en dattes, se chiffrant à 20 kg par palmier (Santoro et *al.*, 2020).



Figure 4 : Une oasis traditionnelle.

❖ Les oasis modernes

Les oasis modernes (Figure 5), se distinguent par l'ampleur de leurs exploitations, caractérisées par une densité adéquate de palmiers (entre 100 et 150 arbres par hectare), une plantation régulière, une prédominance voire une monoculture de variétés dattiers rentables et productive telles que la Deglet Nour en Tunisie. Ces exploitations présentent une rareté de cultures intercalaires ou d'autres plantations. Il est à noter que la taille des exploitations est significativement plus grande (Santoro et *al.*, 2020; Sghaier, 2010).



Figure 5: Une oasis moderne.

5. Condition climatique

Le climat prédominant dans les sud tunisien est de type aride à semi aride, avec des caractéristiques sahariennes marquées, se traduisant par des précipitations peu abondantes et irrégulières, rarement dépassant les 100 mm par an. Les moyennes interannuelles d'évapotranspiration potentielle s'avèrent significative, oscillant entre 1 800 et 2 000 mm/an (Kamel et *al.*, 2006). Les vents continentaux se manifestent par leur caractère sec et froid en hiver, et sec et chaud en été. En moyenne, on enregistre environ 120 jours par an de vents de sable et 40 jours par an de sirocco (Ben Aïssa et *al.*, 2004).

Chapitre 2 : Biodiversité et défis du système oasien tunisien

1. Différents étages des oasis

En Afrique du Nord, la majorité des oasis se compose de petites exploitations privées considérées comme des jardins familiaux, dans lesquels une diversité significative de variétés autochtones est présente. Ces exploitations sont traditionnellement composées de trois étages de végétation distincts. L'étage supérieur est principalement constitué de palmiers dattiers, le deuxième étage se compose d'arbres fruitiers, et enfin, le troisième étage, le plus bas, est caractérisé par la présence de cultures annuelles telles que les céréales, les cultures fourragères, ainsi que divers légumes. Ces systèmes agricoles spécifiques sont disséminés à travers le Sahara, couvrant une superficie totale de plus de 200 000 hectares. Les espèces mentionnées cohabitent fréquemment dans les mêmes oasis. Par conséquent, ces dernières constituent des réserves d'agro-biodiversité génétique (Sellami, 2008 & Santoro *et al.*, 2020). Elles présentent ainsi des conditions propices au développement d'activités économiques durables au niveau local, au maintien du bien-être humain, à l'atténuation des effets du changement climatique et à l'adaptation à celui-ci, puisque la couverture végétale joue un rôle important dans le maintien de la stabilité de l'agriculture dans les régions arides (Santoro *et al.*, 2020).

Les oasis tunisiennes renferment une diversité végétale très riche. Plus de 300 variétés de palmier dattier font partie du répertoire variétal tunisien dont les principales variétés de dattes dans les oasis continentales sont : Deglet Nour, Alig, Kenta, Horra, et Fermla. Dans les oasis littorales, on trouve des variétés telles que Bouhattam et Lemsi. L'arboriculture est également riche et très diversifiée, on y trouve des espèces tel que la vigne, le figuier, le Grenadier, etc. Les légumes et les cultures maraichères sont également très connues et se cultivent pendant les deux campagnes d'été et d'hiver, les céréales sont également cultivées pendant l'automne avec de très haut rendements. Les cultures fourragères sont également très connues, la luzerne tunisienne bénéficie d'une bonne réputation dans tout le territoire oasien. Les cultures industrielles et aromatiques sont pratiquées dans la plupart des oasis dont notamment le Henné, le Tabac, le Rosier, le Basilique, la Menthe, etc. (Sghaier, 2010).



Figure 6: Une Oasis traditionnelle à 3 étages : palmiers dattiers, arbres fruitiers et fourrage (Santoro et al., 2020).

Première étage : Palmiers dattiers

Selon Dransfield et Uhl (1986), la classification taxonomique du palmier dattier est comme suit :

Groupe: *Spadiciflora*

Ordre: *Palmea*

Famille: *Arecacea (Palmaceae)*

Sous-famille: *Coryphoideae*

Division: *Phoeniceae*

Genre: *Phoenix*

Espèce: *Dactylifera L.*

Le palmier dattier, *Phoenix dactylifera*, est considéré comme le symbole du paysage oasien et la base de l'activité agricole dans la région. Il occupe une position prédominante en tant qu'élément central de l'écosystème des oasis. Il représente aussi la principale culture dans la formation du revenu des exploitations phœnicicoles par rapport aux autres cultures. (Aljane et al., 2020)

Cet arbre fruitier se distingue par des caractéristiques nutritionnelles, biochimiques et biophysiques, en plus d'être une source abondante de valeurs esthétiques et culturelles, ainsi qu'une ressource génétique essentielle. Il est à noter que le palmier dattier demeure la seule plante sauvage originaire du désert à avoir été domestiquée dans son environnement naturel défavorable (Jaradat , 2011). Cette espèce génère un microclimat sous son couvert, propice au développement d'autres cultures. Dans les oasis où la disponibilité en eau et terres arables est satisfaisante, on peut observer une stratification des cultures en trois étages. Ainsi, le palmier constitue l'ossature de l'écosystème oasien de régions arides (Daher, 2010).

❖ **Deuxième étage : Arboricultures fruitières**

Le second étage du système agricole se caractérise par une diversité d'arbres fruitiers. La diversification des cultures, leur répartition, la fréquence de chaque espèce, ainsi que leur degré de dominance, sont conditionnés par divers paramètres tels que la vocation régionale, les conditions climatiques, les attentes et les connaissances des agriculteurs. Les espèces les plus répandues sont les Oliviers, les Figuiers et les Grenadiers. D'autres espèces peuvent être présentes aussi, telles que l'abricotier, le pêcher, la vigne et le pommier, bien que moins fréquemment. Certaines espèces fruitières sont plantées à des fins autres que la consommation, à l'exemple du figuier de Barbarie, qui sert comme barrière pour délimiter les différentes parcelles. La riche agrobiodiversité observée dans la culture des arbres fruitiers est due non seulement à la grande variété d'espèces, mais également de la multitude de variétés, ce qui permet de maintenir une diversité génétique significative au sein du système oasien traditionnel (Santoro et *al.*, 2020).

❖ **Troisième étage : Etage herbacé**

Le troisième étage présente une importance particulière pour la prospérité des communautés locales, en fournissant une diversité de cultures maraîchères destinées à la consommation familiale ainsi que du fourrage pour les animaux. De plus, la préservation des variétés autochtones, réalisée à travers la conservation domestique des semences, constitue une culture alimentaire unique, qui est aussi une attraction régionale (Santoro et *al.*, 2020).

2. L'effet oasis

La définition du phénomène " effet oasis" renvoie à la dynamique de refroidissement induite par la présence de végétation. En contexte aride, une source d'humidité isolée demeure généralement plus fraîche que son environnement, résultant du processus de refroidissement par évaporation. L'oasis désertique constitue un exemple évident de ce phénomène. Dans des zones fortement couvertes par des végétaux, un effet de refroidissement se développera principalement en raison de l'ombre fournie par les arbres. Kai et *al.*, (1997) & Potchter et *al.*, (2008) ont précisément défini ce phénomène d'effet oasis comme un refroidissement par évaporation, dû aux différences d'équilibre énergétique entre l'oasis et le désert environnant.

En effet, le palmier dattier est parfaitement adaptée aux climats arides et sahariens, il offre aux espèces de deuxième et troisième étage une ambiance favorable pour la croissance et la production (Ferry et Toutain, 1990). Selon Masmoudi (2000), le palmier dattier joue un rôle d'écran, en protégeant les oasis contre les influences désertiques et crée un microclimat favorisant le développement des cultures sous-jacentes en permettant d'atténuer l'agressivité du milieu environnant.

Selon Liu et *al.*, (2020), plusieurs phénomènes liés aux mouvements d'air à l'intérieur de l'oasis et à la circulation locale à l'intérieur de celui-ci sont inclus dans les interactions entre une oasis et un désert :

- Effet de bouclier éolien de l'oasis où la vitesse du vent est réduite grâce à la végétation de l'oasis, créant ainsi une zone de protection relative à l'intérieur de celle-ci.
- Effet d'îlot froid-humide de l'oasis (effet oasis) : Durant le jour, la végétation dans l'oasis transpire et dégage de l'humidité dans l'atmosphère. Cela crée un îlot de fraîcheur et d'humidité au sein de l'oasis, entraînant ainsi une baisse locale de la température par rapport aux régions environnantes du désert
- Effet d'inversion de l'humidité de l'air dans le désert (effet désert) : L'oasis peut influencer l'humidité de l'air dans le désert environnant. La différence de pression entraîne un flux d'air humide et froid de l'oasis vers le désert. Ce qui crée des conditions légèrement plus humides dans le désert à proximité de l'oasis.

3. Les défis actuels du système oasien

Bien que les oasis aient une existence séculaire, elles font face à des défis et des déclin dans différentes régions du monde, comme souligné par Jouve (2012). Ces écosystèmes complexes rencontrent fréquemment des problèmes tels que la remontée de la nappe phréatique et la salinisation des sols, accentués par une gestion défectueuse de l'irrigation et du drainage. Les oasis, souvent situées en bordure de chotts, font face à des difficultés liées aux faibles dénivelés entre les oasis et les chotts, empêchant ainsi l'évacuation des eaux. Ces facteurs cumulés perturbent le fonctionnement hydrosalin optimal de l'oasis, mettant en danger l'équilibre du système oasien et menaçant sa durabilité (Ben Aïssa et *al.*, 2004).

Parallèlement, les oasis sont confrontées à une diminution des ressources en eau, une problématique cruciale pour leur subsistance (CDCGE, 2015). Cette diminution découle en partie de la création de nouvelles exploitations agricoles à proximité des anciennes oasis, mettant ainsi en péril les nappes phréatiques fragiles et menaçant l'existence des oasis traditionnelles. Les contraintes naturelles telles que la sécheresse structurelle, l'ensablement et la désertification ajoutent une pression supplémentaire sur ces écosystèmes fragiles.

Les oasis de montagne en Tunisie, initialement considérées comme des oasis traditionnelles, font l'objet de transformations significatives, comme le soulignent Santoro et *al.*, (2020). Ces transformations sont principalement attribuables au vieillissement de la population locale, à l'émigration des jeunes vers les zones urbaines, aux coûts de production élevés par rapport à la valeur marchande des dattes, à la diminution du tourisme, et à la rareté croissante de l'eau. Ces facteurs impactent la dynamique sociale et économique des oasis de montagne.

Selon le rapport de la GIZ (2012), par rapport à la dégradation et l'impact du changement climatique sur les oasis tunisiennes, plusieurs défis majeurs ont été identifiés. En ce qui concerne les défis environnementaux, les oasis souffrent d'une surexploitation et une baisse de la qualité des ressources en eau, aggravées par l'augmentation des forages et sondages illicites. Cette surexploitation conduit au rabattement des nappes phréatiques et à une augmentation de la salinité, tout en intensifiant la compétition entre le secteur agricole, le secteur des eaux potables, et les nouvelles exploitations. Les problèmes liés à l'eau et à l'irrigation sont également alarmants, avec le gaspillage des eaux de chauffage dans certains périmètres géothermiques, la pollution des eaux d'irrigation par les eaux usées domestiques, et

un manque de sécurité dans l'approvisionnement en eau d'irrigation. De plus, l'entretien insuffisant des réseaux de drainage et la stagnation de ces eaux due aux extensions illicites aggravent la situation. La perte de biodiversité est une autre préoccupation majeure, marquée par l'expansion excessive de la variété de dattes "Deglet Nour" au dépend d'autres variétés, et la diminution des variétés locales de cultures maraîchères et d'arbres fruitiers. Enfin, les oasis sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques, avec une élévation des températures et une baisse des précipitations prévues, affectant ainsi les ressources en eau, les niveaux statiques des forages, et augmentant les coûts de pompage. L'intrusion des eaux marines dans les oasis littorales et les difficultés d'écoulement des eaux de drainage posent également de sérieux problèmes. Ces défis soulignent les limites et les problèmes auxquels les oasis sont confrontées, nécessitant des interventions urgentes et coordonnées pour leur préservation et leur durabilité.

4. Impact de l'eau sur la biodiversité

La fréquence d'irrigation dans les oasis de Kébili est de l'ordre d'une irrigation par 1 mois chez 66 % des agriculteurs oasiens. Seulement 24 % des exploitants sont en mesure d'irriguer 2 fois/mois (Figure 7). Telle fréquence est à la limite de satisfaire les besoins du palmier dattier et affecte considérablement la pratique des cultures fruitières, maraîchères et fourragères. Ce qui explique, la prolifération des puits illicites qui contribuent à apporter un complément nécessaire pour satisfaire les besoins des cultures eaux surtout dans la période estivale. La disponibilité de l'eau est le facteur limitant qui façonne l'existence et les choix des cultures pratiquées par l'agriculteur oasien. (Aljane et *al.*, 2020)

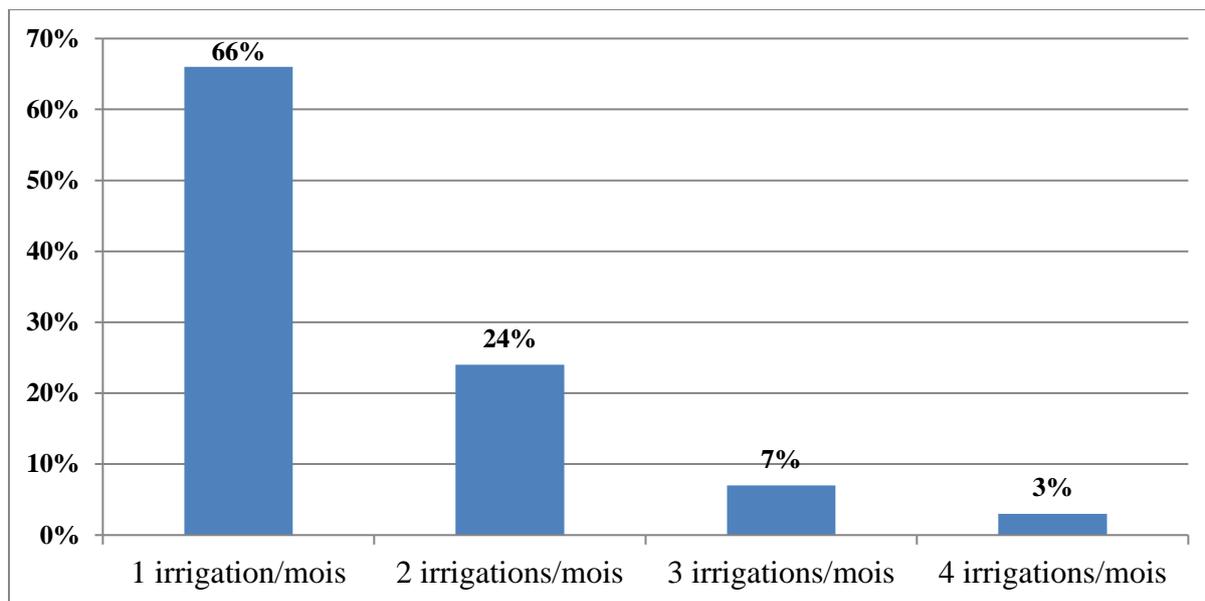


Figure 7: Variation des fréquences d'irrigation dans les oasis de Kebili (Aljane et *al.*,2020)

D'après les travaux de Benmoussa et *al.*(2022), il existe une corrélation significative entre la fréquence d'irrigation et le nombre d'étages (Figure 8A), ainsi qu'une relation de dépendance du nombre d'espèce cultivées avec les palmiers dattier et la fréquence de l'irrigation par mois (Figure 8B). D'où une irrigation fréquente et bien gérée peut engendrer une diversification des cultures au sein des oasis tunisien.

Il est montré que les parcelles irriguées moins d'une fois par mois ont tendance à être organisées en un ou deux étages, tandis que celles irriguées quatre fois ou plus par mois sont plus organisées en trois étages. Par conséquent, plus la fréquence d'irrigation est élevée, plus l'agrobiodiversité augmente de manière positive.

L'agrobiodiversité est significativement menacée par la transition des pratiques agricoles traditionnelles, multicouches, vers une monoculture dominée par les palmiers dattiers (Benmoussa et *al.*, 2022).

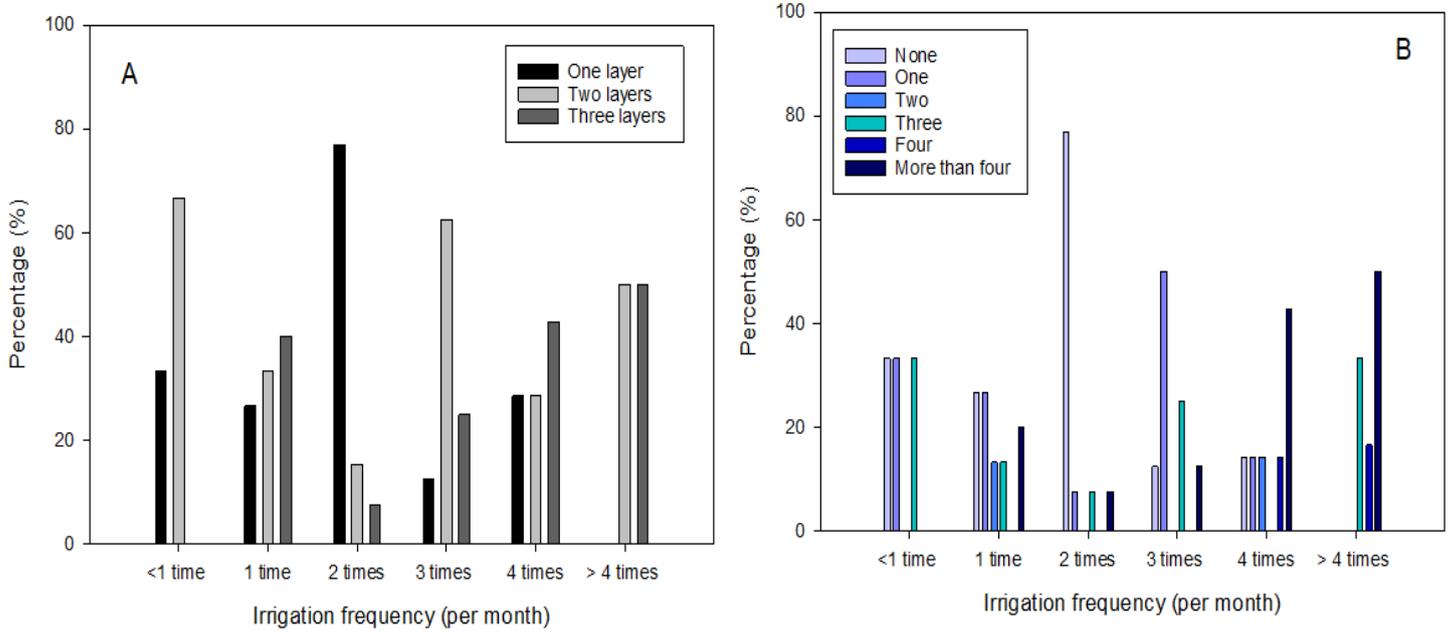


Figure 8: Lien entre la fréquence d'irrigation et (A) le nombre d'étages dans les parcelles oasiennes ou (B) le nombre d'espèces cultivées avec le palmier dattier (Benmoussa *et al.*, 2022)

Chapitre 3 : Les ressources en eaux des systèmes oasiens

L'expansion territoriale des oasis tunisiennes a également facilité la mobilisation pratiquement exhaustive des ressources hydriques. Toutefois, elle fait actuellement face à une problématique de durabilité, laquelle pourrait s'aggraver d'une année à l'autre en raison de la conjonction des répercussions du changement climatique. (Labidi, 2019). Les ressources hydriques de la région des oasis représentent environ 34,85% du volume total des ressources en eau souterraines de la Tunisie. Il convient de noter que la majeure partie de ces ressources provient principalement des nappes profondes, contribuant à 87,2% du total des ressources hydriques de la région (CDCGE, 2015).

Actuellement, les oasis du sud tunisien tirent leur approvisionnement en eau de deux nappes fossiles distinctes (le Complexe Terminal et le Complexe Intercalaire) ainsi que des nappes phréatiques. (Ben Aïssa et *al.*, 2004).

1. Le Continental Intercalaire (CI)

Il s'agit d'un système aquifère captif multicouche émergeant à une profondeur dépassant les 2000 mètres, exploité par des forages profonds variant de 63 mètres pour le niveau supérieur à 2800 mètres pour le niveau inférieur. La nappe du complexe intercalaire (CI) est fortement artésienne, avec une température géothermale significative atteignant 70 °C et une salinité d'environ 2,5 g/l. (Ben Aïssa et *al.*, (2004) ; Zammouri et *al.*, (2007))

2. Le Complexe Terminal (CT)

La nappe du Complexe Terminal constitue une source majeure, contribuant à elle seule à plus de 80% des besoins en eau potable et en eau d'irrigation des oasis de Tozeur et Kebili. Elle s'étend sur une superficie de 350 000 km², principalement localisée en Algérie. Cette nappe se trouve à des profondeurs variant de 60 à 500 mètres, présentant une salinité de 5 g/l (Kamel et *al.*, (2006) ; Ben Aïssa et *al.*, (2004)).

3. Les nappes phréatiques

Les nappes phréatiques du sud tunisien ont des origines différentes. Alors que certaines sont approvisionnées par les eaux de crues, d'autres sont issues des émergences de la nappe du complexe Terminal ou du continental intercalaire, et d'autres encore sont alimentées par l'eau d'irrigation utilisée autour des oasis.

Ces eaux sont plus accessibles à l'exploitation à l'aide de puits forés ne dépassant pas 50 m de profondeur. Par conséquent, l'exploitation de cette nappe ne cesse pas d'augmenter (Kamel et *al.*, 2006).

4. Les systèmes d'irrigation dans les oasis

L'irrigation est le processus qui consiste à fournir artificiellement de l'eau à des plantes cultivées afin d'accroître leur production et de favoriser leur développement normal. Elle intervient notamment en réponse à des conditions de déficit hydrique causées par un manque de précipitations, un drainage excessif ou une diminution du niveau de la nappe, surtout dans les régions arides (Faghim et *al.*, 2022). Par ailleurs, la méthode d'irrigation appliquée dans les oasis ne se base pas sur les besoins réels des cultures. Cette approche de gestion peut engendrer des périodes de stress hydrique, entraînant des baisses de rendement, ou à l'inverse, des apports d'eau excessifs, provoquant un gaspillage des ressources. La distribution de l'eau dans les oasis suit le système du tour d'eau, établi en fonction des superficies plutôt que des exigences spécifiques des cultures. Chaque antenne est pourvue de bornes d'irrigation, chacune desservant un ensemble de parcelles (3 à 4 hectares). La durée moyenne d'irrigation s'étend de 10 à 14 heures par hectare, correspondant à une dose d'irrigation de 90 à 120 mm par tour d'eau. À partir du mois d'avril, l'apport en eau augmente, que ce soit par l'augmentation de la main d'eau ou l'extension de la durée d'irrigation. Néanmoins, dans la réalité, les durées et les doses d'irrigation ne sont que partiellement observées (Dhaouadi et *al.*, 2015).

La gestion de la distribution d'eau au sein d'une parcelle d'oasis est assurée par l'agriculteur à travers principalement trois types de systèmes. Le premier, de nature traditionnelle, repose sur l'organisation en cuvettes et planches approvisionnées par une séguia principale en terre. Le deuxième, de conception améliorée, implique l'utilisation de conduites en PVC pour acheminer l'eau d'une planche à une autre. Enfin, le troisième système, appelé système en calant, se caractérise par l'installation de larges bandes entre les palmiers (Ghazouani et *al.*, 2007).

4.1. Irrigation de surface

L'irrigation de surface désigne la pratique consistant à acheminer l'eau vers le point le plus élevé du terrain, permettant ainsi son écoulement naturel par gravité. Par la suite, l'eau est

répartie dans le champ, que ce soit par immersion (méthode des bassins d'irrigation), à travers des sillons creusés dans le sol (système d'irrigation par sillons), ou par le ruissellement à la surface d'une planche d'arrosage (technique d'irrigation par planches) (Brouwer et *al.*, 1990).

❖ Irrigation par bassins

Les bassins, composés de cuvettes en terre au fond presque plat et entourées de diguettes de faible hauteur, sont conçus pour empêcher l'eau de s'écouler vers les champs voisins. Couramment utilisée pour l'irrigation des rizières sur terrain plat ou des terrasses en pente, cette méthode est également adoptée pour les arbres fruitiers, où chaque arbre est entouré d'une petite cuvette (bassin). Elle convient particulièrement aux cultures capables de supporter une submersion prolongée, généralement de 12 à 24 heures (Brouwer et *al.*, 1990).

❖ Irrigation par sillons/à la raie

Les sillons, de petites rigoles en terre aménagées dans le sens de la pente du terrain, sont utilisés pour acheminer l'eau entre les rangées de cultures. L'eau s'infiltré principalement par les côtés du sillon le long de son parcours descendant. Adaptée à toutes les cultures en rangées et à celles qui ne tolèrent pas une submersion prolongée du feuillage ou du collet, cette méthode est alimentée par des prises d'eau sur les berges du canal d'amenée, pouvant être des ouvertures simples, des siphons ou des tuyaux traversant la berge du canal (Brouwer et *al.*, 1990).

❖ Irrigation par planches

Les planches, également appelées calants ou planches d'arrosage, sont des bandes de terrain en pente douce séparées par des diguettes. L'eau peut être acheminée vers les planches par des prises d'eau équipées de vannettes sur le canal d'amenée, des siphons ou des tuyaux passant à travers les berges du canal. La lame d'eau introduite ruisselle le long de la pente de la planche, guidée par les diguettes des deux côtés (Brouwer et *al.*, 1990).

4.2. Irrigation localisée

L'irrigation au goutte-à-goutte implique l'acheminement d'eau sous pression à travers un réseau de canalisations, généralement en PVC. Cette eau est ensuite distribuée en gouttes dans le champ par de nombreux goutteurs répartis le long des rangées de plantations. La zone

du sol humidifiée est limitée à proximité immédiate des racines des plantes. Ainsi, cette méthode d'irrigation offre un niveau élevé d'efficacité dans la distribution de l'eau appelée micro-irrigation, elle permet une utilisation précise et ciblée de la ressource hydrique. (Brouwer et *al.*, 1990).

5. Paramètres de l'irrigation

5.1. Besoin en eau

Les palmiers-dattiers ont des besoins en eau significatifs, avec une estimation d'environ 2 m³ d'eau par kilogramme de fruits dans des conditions optimales. En Californie, la consommation moyenne d'eau par arbre et par an pour les palmiers-dattiers est estimée entre 200 et 250 m³ (Akyurt et *al.*, 2002). Ces arbres montrent une remarquable résistance à la sécheresse, capable de survivre à plusieurs années de chaleur intense sans eau ni pluie une fois bien établis, bien que leur fructification puisse être compromise et qu'ils puissent présenter des signes de stress. Il est intéressant de noter que les dattiers démontrent une résistance supérieure à la plupart des plantes en cas de saturation en eau, prospérant même lorsque leurs racines sont immergées dans l'eau ou dans des sols présentant une nappe phréatique élevée, voire salée (Akyurt et *al.*, 2002).

En tenant compte des propriétés physiques des sols, une irrigation fréquente est nécessaire pour la culture du palmier dattier et pour les autres cultures herbacées, particulièrement en été. Alors, les drains à ciel ouvert exigent une maintenance continue, en particulier dans les nouvelles plantations, à cause du risque d'éboulement et de colmatage des canaux (Kadri et Van Ranst, 2002).

Selon les travaux de Sedra (2003), les besoins d'eau chez le palmier sont ressentis notamment :

- ✓ Au début de l'époque de croissance après la récolte et le repos végétatif.
- ✓ Durant l'époque de floraison et de nouaison.
- ✓ Durant l'époque du développement des fruits et de leur coloration.
- ✓ Durant l'époque de maturation des dattes.

Le tableau 2 montre les fréquences d'irrigation pour un système oasien en un étage, En cas de présence de cultures associées au palmier, il est conseillé de rapprocher les tours d'eau en été très chaud et en hiver très sec. Il faut noter que ce rythme doit être adapté en fonction de la localisation et les conditions pédoclimatiques de la région.

Tableau 2: Calendrier d'irrigation de palmier dattier adultes productifs en fonction des localités (Sedra, 2003).

Activité biologique	Période de l'activité	Fréquence d'irrigation/mois
Repos végétatif après la récolte et début du développement	Décembre – Janvier	2-3
Floraison	Février – Mars	3-4
Nouaison et premiers stades du développement du fruit	Avril – Mai	4-5
Grossissement des fruits et de leur coloration	Mai – Août	5-6
Maturation des dattes	Septembre- Novembre	4-5

Partie 2 : Matériel et Méthodes

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude

1. Localisation et caractéristiques de la zone de Kebili

Le gouvernorat de Kebili, appartient à la partie Sud-ouest de la Tunisie. Il couvre une superficie de 22 490 km², soit 14,4 % de la superficie totale du pays, et occupant 24,9 % de la région sud. Il est bordé au Nord par la chaîne montagneuse de Chott El Fejj et à l'Ouest par Chott El Jerid, tandis que le sud et le sud-est sont délimités par le Sahara septentrional (Kadri et Van Ranst, 2002). Cette localisation géographique particulière confère au gouvernorat de Kebili des caractéristiques distinctives, notamment en termes de relief et de proximité avec des formations naturelles telles que les montagnes et les zones désertiques. Les terres agricoles représentent 27% de la superficie totale du gouvernorat de Kebili (621179 ha en 2018) (Mekki et al.,2021).



Figure 9: Carte administrative des délégations de gouvernorat de Kebili (Gouvernorat de Kebili en chiffres, 2021)

La présente étude concerne la délégation de Kebili sud : l'oasis d'El Kaabi et l'oasis d'el Barghothia.

2. Conditions climatique de la zone

La situation géographique de Kebili lui confère un climat aride. Elle est soumise à l'influence du climat continental, froid en hivers et chaud en été et située dans l'étage saharien à hivers frais. Elle présente ainsi un climat marqué par la rareté, l'irrégularité et l'insuffisance des précipitations où les moyennes annuelles sont de l'ordre de 90 mm (Aljane et *al.*, 2020).

Principalement située dans l'étage bioclimatique saharien, la région se caractérise par une température moyenne annuelle de 20,9 °C, avec des hivers froids et des étés chauds. (Mekki et *al.*, 2021). Ce contexte climatique se distingue par une amplitude thermique significative, inter-journalière et inter-saisonnière illustrée par des variations marquées entre des températures maximales dépassant les 39,4 °C en juillet et des températures minimales descendant jusqu'à 4°C en janvier (Mekki et *al.*, 2009).

Les oasis de la région de Kébili avec leurs différents étages forment un micro climat différent du milieu environnant où la température est plus basse, l'humidité est plus élevée et la violence des vents moins ressentie (Aljane et *al.*, 2020).

L'évapotranspiration moyenne annuelle, atteignant 1158 mm/an, connaît son pic en mai (377,6 mm) et son point le plus bas en décembre (55,8 mm).

Les vents prédominants, parfois intenses avec des vitesses dépassant les 100 km/h et fréquents environ 120 jours par an, adoptent différentes directions selon les saisons. En hiver, ils proviennent du Sud-ouest, tandis qu'en été, le vent prédomine de l'Est, avec une influence notable du sirocco (Mekki et *al.*, 2009).

3. Distribution de l'eau d'irrigation dans la région de Kebili

La gestion de l'irrigation est gérée par le GDA (Groupement de développement agricole). L'irrigation est faite selon un tour d'eau suivant une règle théorique de 12 h/ha en période estivale et à la demande en période hivernale. (Ghazouani et *al.*, 2007). Les agriculteurs ont mis l'accent sur l'allongement excessif du tour d'eau, qui dépasse en général 30 jours et peut atteindre même 60 jours en période estivale (Mekki et *al.*, 2021).

L'irrigation des oasis de la région de Kébili est principalement assurée par les eaux provenant des forages publics.

Les exploitants qui se basent uniquement à ces forages pour irriguer leurs oasis représentent environ 60 %, alors que ceux qui utilisent ces eaux avec un compliment des puits privés est de l'ordre de 23 %. Pour ce qui est des puits privés, ils sont illicites dont le nombre a considérablement augmenté ces dernières années représentant 14,15% de l'ensemble des agriculteurs enquêtés (Figure 1) (Aljane et *al.*, 2020)

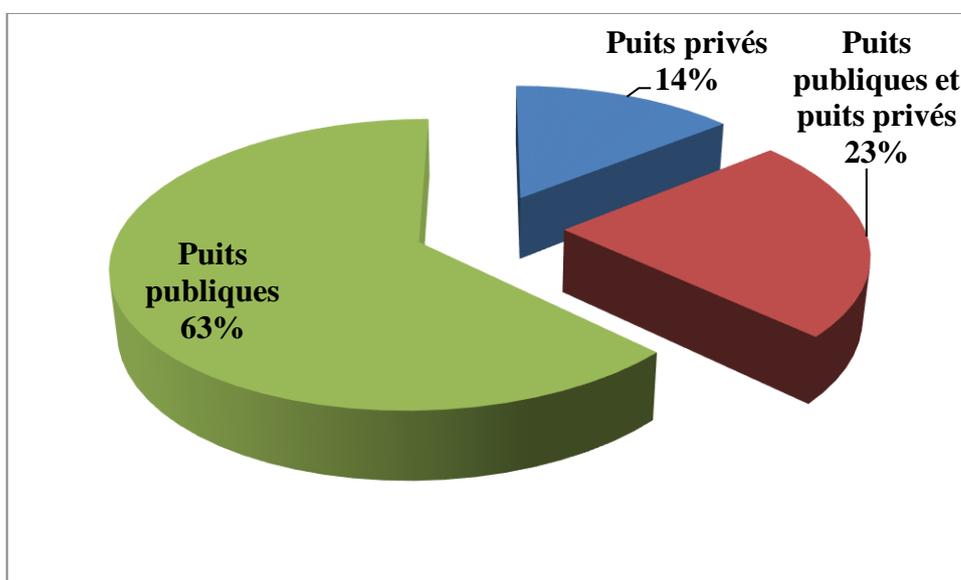


Figure 10: Répartition de la source de l'eau d'irrigation dans les oasis de Kebili (Aljane et *al.*, 2020)

Chapitre 2 : Suivi de l'état hydrique et de la gestion de l'irrigation

1. Les sondes capacitives

La méthode capacitive est employée pour mesurer la teneur en eau dans les matériaux tels que les sols ou le béton. Les sondes capacitives offrent l'avantage d'explorer diverses profondeurs d'investigation grâce à leurs différents capteurs (Fares et *al.*, 2014).

La technique capacitive repose sur les relations entre l'humidité et les propriétés diélectriques des sols. Elle mesure la permittivité diélectrique relative du sol à l'aide d'une sonde capacitive, composée de deux électrodes connectées à un oscillateur électronique, ou d'un circuit électrique résonant. Cette permittivité diélectrique relative est fortement influencée par la teneur en eau du sol dans la gamme de fréquence sélectionnée, généralement de 1 à 100 MHz. La partie réelle de la permittivité diélectrique relative de l'eau libre est de 80, celle des constituants solides du sol varie entre 2 et 7 environ, tandis que celle de l'air est de 1. Étant donné que le sol est un système tri-phasique composé d'une matrice solide avec des pores occupés par des gaz et la solution du sol, son comportement diélectrique global dépend de la permittivité diélectrique relative, de l'arrangement et de la concentration volumique de chacun de ses constituants élémentaires, en particulier l'eau (Gaudu et *al.*, 1993).

2. Collecte et analyse de données

Dans le cadre du projet Massire, 4 sondes de type SENTEK sont installées ;

- Une première sonde installée au niveau de l'oasis d'El Barghouthia dans une parcelle d'un seul étage de palmier dattier dont les données sont enregistrées depuis novembre 2021 avec le nom Massire 1 (Figure 11, A).
- Une deuxième sonde installée au niveau de l'oasis d'El Barghouthia dans une parcelle de trois étages dont les données sont disponibles depuis novembre 2021 également avec le nom Massire 2 (Figure 11, A).
- Une troisième sonde installée au niveau de l'oasis d'El Kaabi dans une parcelle à un seul étage avec une source complémentaire d'irrigation, dont les données sont disponibles depuis mars 2023 avec le nom Kaabi 1 (Figure 11, B).

- Une quatrième sonde installée dans une autre parcelle à un seul étage au niveau de l'oasis d'El Kaabi avec des données enregistrées depuis mars 2023 avec le nom Kaabi 2 (Figure 11, B).

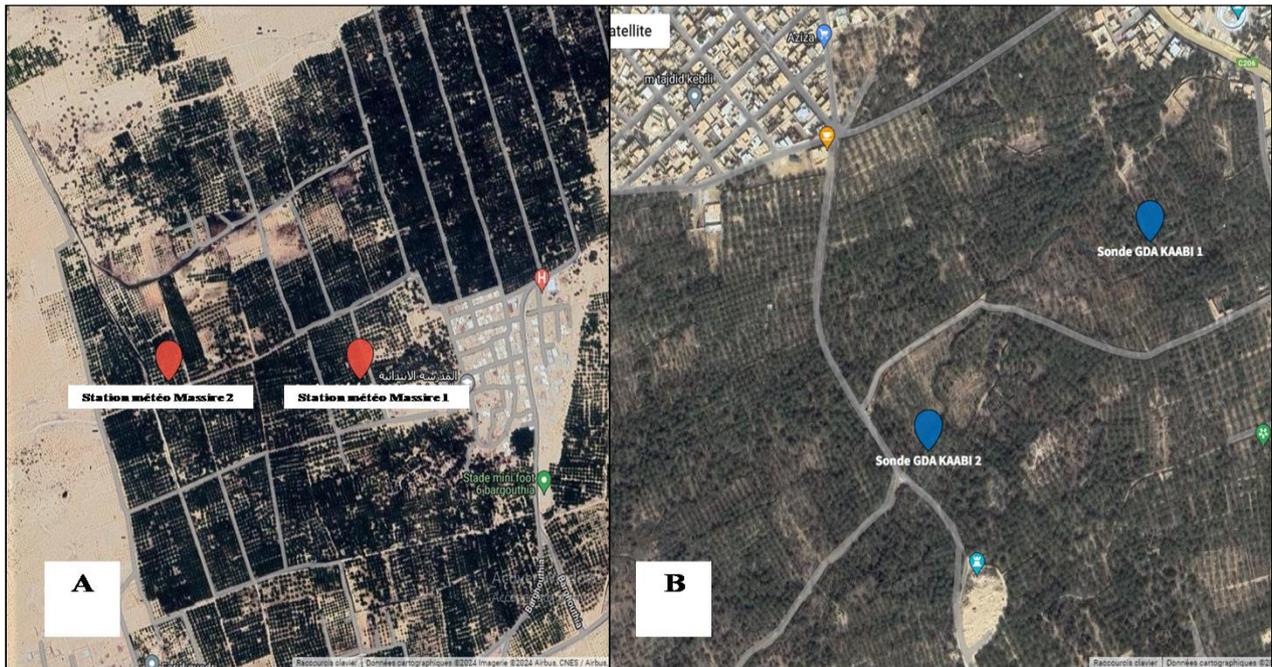


Figure 11: Image satellitaire de l'emplacement des sondes capacitatives; A: Les sondes d'El Barghouthia; B: Les sondes d'El Kaabi.

Ces sondes mesurent le cumul d'eau dans le sol en mm pour une profondeur de 60cm, l'humidité, la température ainsi que la salinité au niveau de six profondeurs du sol (5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 45cm, 55cm).

Ces valeurs sont enregistrées chaque 10 minute.

Les données sont accessibles depuis la plateforme Food Quality (Figure 12)

<https://food-quality.info/#/aqualis-stations>.

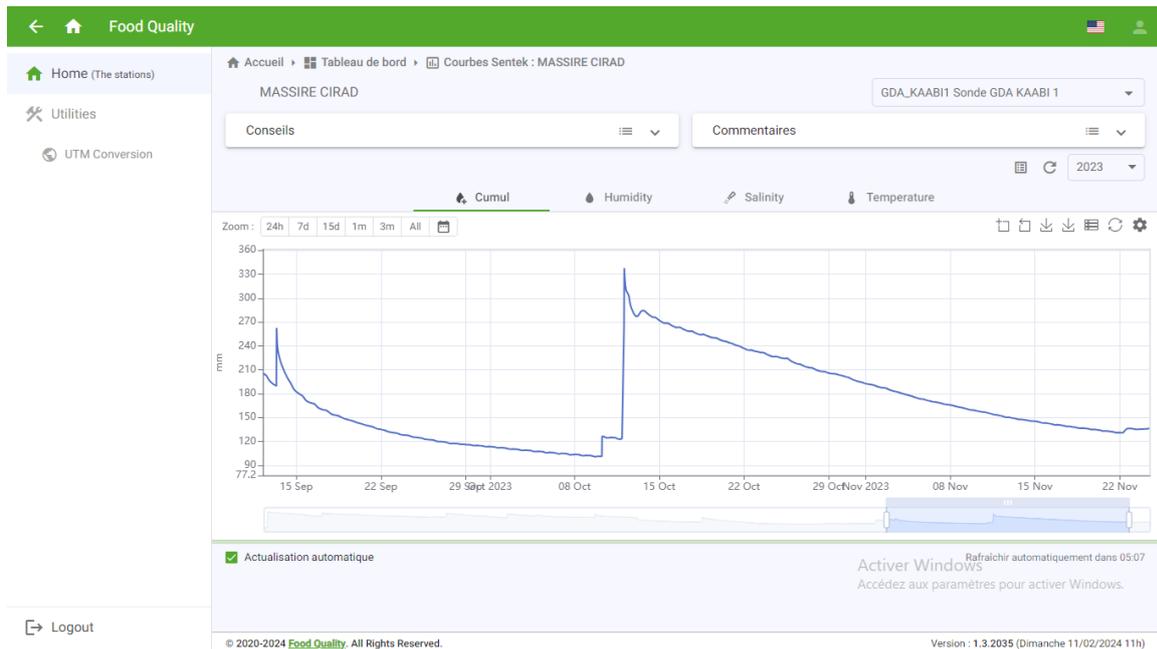


Figure 12: Plateforme Food Quality pour le suivi des paramètres des sondes capacitatives.

3. Estimation de la quantité d'eau disponible à la plante

D'après Gaudin et Brouwers (2003), la réserve utile (RU) et la réserve facilement utilisable (RFU) sont des concepts clés pour la gestion de l'eau pour l'agriculture, intégrant à la fois les caractéristiques du sol (capacité de rétention en eau) et celles de la plante (profondeur des racines exploitées, humidité à partir de laquelle la croissance est réduite, et point de flétrissement). Le point de flétrissement permanent est associé à une valeur de $pF = 4,2$, où le pF représente le cologarithme du potentiel matriciel en cm d'eau. Ce potentiel est inversement proportionnel à la succion, indiquant la tension à laquelle l'eau est retenue dans le sol et donc inaccessible aux plantes

La capacité au champ (CC) se réfère à l'humidité atteinte après environ deux jours de ressuyage suivant une forte pluie ou un apport d'eau conséquent, période durant laquelle l'excès d'eau s'écoule par drainage gravitaire, laissant une quantité d'eau utilisable par les plantes. La réserve utile est définie par la relation : $RU = z_r (\theta_{CC} - \theta_{FP})$, où z_r est la profondeur exploitée par les racines, θ_{CC} l'humidité volumique à la capacité au champ du sol, et θ_{FP} l'humidité volumique au point de flétrissement permanent (Gaudin et Brouwers, 2003).

La réserve facilement utilisable (RFU) est la portion de cette eau utile qui est accessible sans difficulté par la plante, généralement utilisée pour calibrer les doses d'irrigation. La valeur de la RFU est souvent déterminée par la formule $RFU = 2/3 RU$ ou $RFU = 1/2 RU$ selon les auteurs. Cette fraction de la réserve utile représente l'eau que les plantes peuvent extraire facilement avant que le stress hydrique ne commence à affecter leur croissance (Gaudin et Brouwers, 2003).

Chapitre 3 : Caractérisation du microclimat oasien

1. Les stations météo

Afin de bien comprendre la différence du microclimat et l'effet oasis entre une exploitation à trois étages et une exploitation à un étage, deux stations météo sont installées dans les deux parcelles de l'oasis d'El Barghouthia : Massire 1 la parcelle à seul étage de palmier dattier, Massire 2 la parcelle à trois étages.

Les données enregistrées sont : la température, l'humidité de l'air, la pression atmosphérique, la pluviométrie, la vitesse du vent ainsi que le vent rafale. Elles sont enregistrées chaque 10 minute et sont disponible sur la plateforme Food Quality.

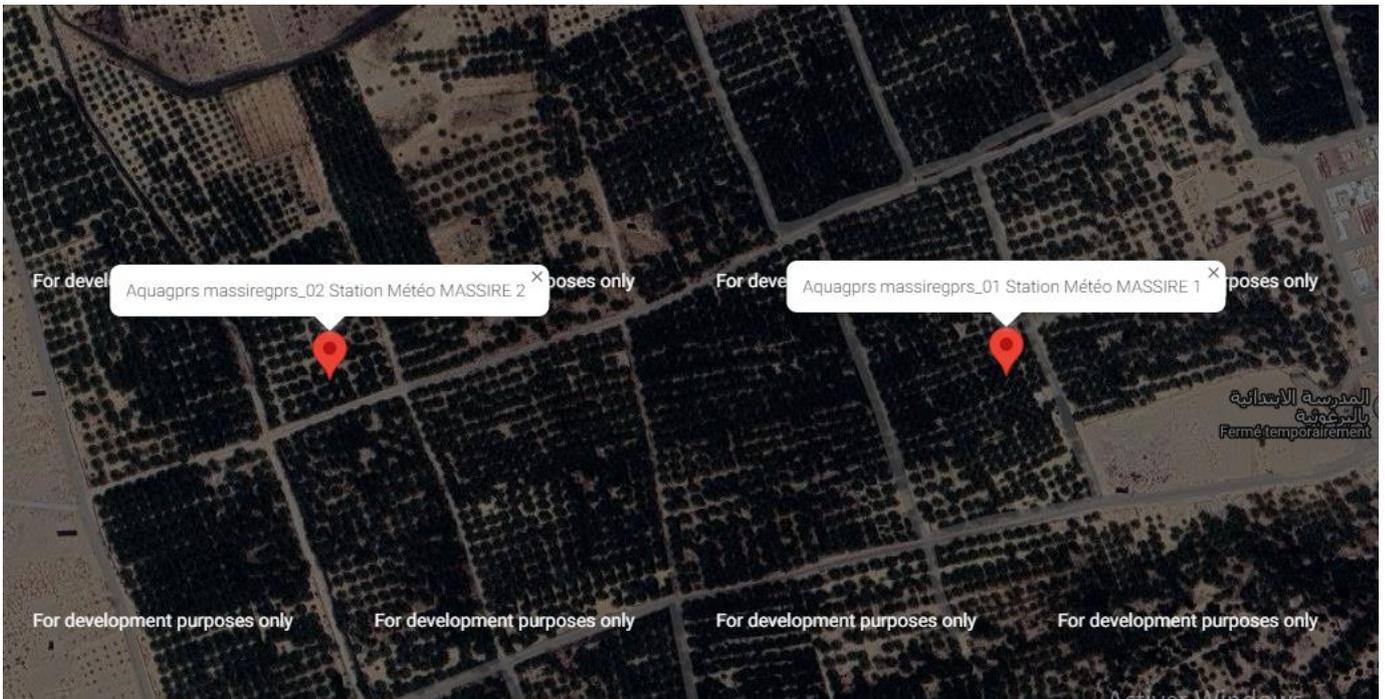


Figure 13: Image satellitaire de l'emplacement des stations météo..

2. Estimation des quantités de chaleur accumulées

Afin de déterminer les quantités de chaleur disponibles dans chacun des deux oasis, on a estimé la somme des températures chaudes (GDH) selon le modèle de Shaltout et Unrath (1983).

$$GDH = \sum (T_{max} - 4.4^{\circ}C)$$

Avec T_{max} est la température maximale enregistrée à une heure donnée de la journée; $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ est la température de base, sauf si la température est inférieure ou égale à $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, auquel le GDH est égal à 0.

3. Estimation des portions de froid disponibles par le modèle dynamique

Le modèle dynamique est le résultat des expérimentations menées sous des conditions de températures contrôlées. Il met en évidence l'importance des séquences de températures fraîches et chaudes pour l'accumulation du froid, en soulignant le fait que les températures modérées optimisent ce processus. Zhang et Taylor (2011) ont estimé les quantités de froid (Chill portions) selon le modèle dynamique par la série de formules suivante :

$$X_i = \frac{e^{slp \cdot tet_{mlt} \cdot (T_k - tet_{mlt}) / T_k}}{1 + e^{slp \cdot tet_{mlt} \cdot (T_k - tet_{mlt}) / T_k}}$$

$$X_s = \frac{a_0}{a_1} \times e^{\frac{e_1 - e_0}{T_k}}$$

$$a_{k1} = a_1 \times e^{-(e_1 / T_k)}$$

$$\text{inter } E = X_s - (X_s - \text{inter } S) \times e^{-a_{k1}}$$

$$\text{inter } S = \begin{cases} t = t_0 ; 0 \\ t > t_0 \text{ et } \text{inter } E_{t-1} < 1 ; \text{inter } E_{t-1} \\ t > t_0 \text{ et } \text{inter } E_{t-1} \times (1 - X_i) \end{cases}$$

$$\text{delt} = \begin{cases} t = t_0 ; 0 \\ t > t_0 \text{ et } \text{inter } E < 1 ; 0 \\ t > t_0 \text{ et } \text{inter } E \geq 1 ; X_i \times \text{inter } E \end{cases}$$

$$\text{Chill portions } t = \begin{cases} t = t_0 ; \text{delt} \\ t \geq t_0 ; \text{delt} + \text{Chill portions } t-1 \end{cases}$$

Partie 3 : Résultats et discussion

Chapitre 1 : Evaluation des données de l'irrigation

1. L'Oasis de Barghouthia

1.1 Stratégie du GDA

L'oasis de Barghouthia fait partie du périmètre public irrigué (PPI) où l'eau d'irrigation est entièrement gérée par le Groupement de Développement Agricole (GDA) de Barghouthia. Ce GDA, règle les factures de la Société Tunisienne de l'Électricité et du Gaz (STEG) mensuellement. Alors que les agriculteurs de ce PPI paient les frais d'irrigation annuellement, à raison de 500 DT pour chaque 0,25 hectare. Selon la norme du ministère de l'Agriculture, la durée d'irrigation est de 12h/ ha. Le tour d'eau fixé par le GDA à 22 jours avec un débit de 18l/s sauf dans les cas de pannes mécanique (au niveau des pompes) ou une panne électrique (au niveau de l'électricité des vannes). Les vannes d'irrigation fonctionnent tout au long de la journée sauf durant les périodes estivales où elles sont interrompues de 11h à 15h, et durant les périodes hivernales de 18h à 22h. Pendant la période de maturation et de récolte des dattes (période automnale), la demande en irrigation diminue, permettant ainsi au GDA de réduire le temps de fonctionnement des vannes.

1.2 Parcelle à un seul étage à Barghouthia : Massire 1

Cette parcelle se trouve dans la zone de Barghouthia, un village de Kebili sud, et appartient au GDA Alitkan Barghouthia. Cette oasis occupe une superficie de 0.5 ha avec 36 palmiers dattiers de la variété Deglet Nour avec de l'avoine fourragère sous chaque palmier.



Figure 14: Parcelle d'un seul étage à El Bargouthia

La parcelle dispose un système d'irrigation par cuves (Figure 15). Chaque cuve comprend trois palmiers dattiers disposés en ligne et reliés entre eux par un sillon. Les cuves sont interconnectées par des tubes en PVC enterrés, permettant la distribution de l'eau. L'agriculteur peut dispose le contrôle totale sur la distribution de l'eau entre les cuves selon le besoin, en fermant les tubes enterrés par des bouchons.

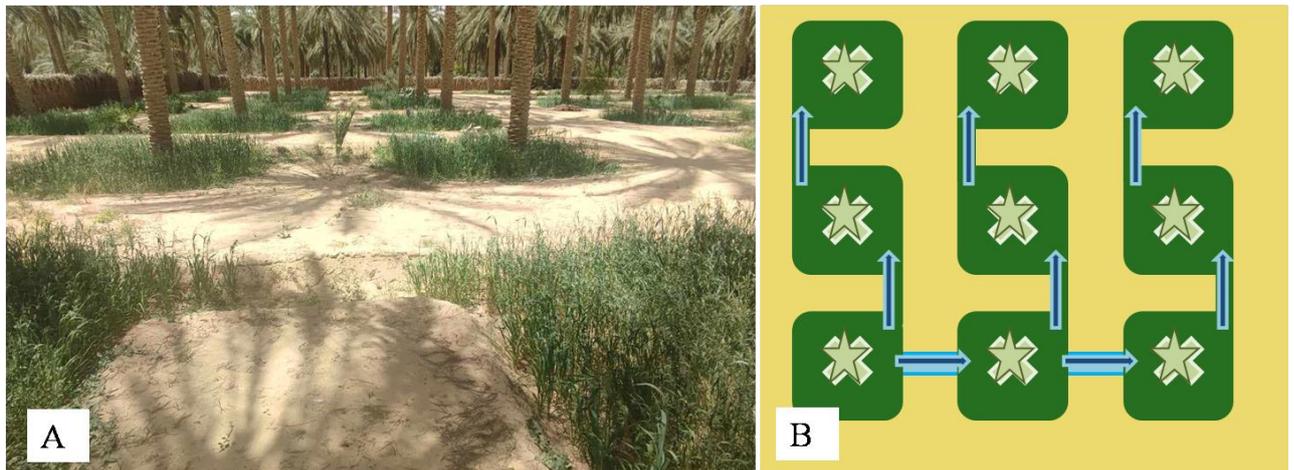


Figure 15: Le système d'irrigation de la parcelle à un seul étage; A: Sillon liant deux palmiers dattiers du même cuve; B: Schématisation du flux de l'eau d'irrigation au sein de la parcelle.

En plus de l'eau gérée par le GDA, la parcelle est équipée par d'un puits privé qui se caractérise par une profondeur qui dépasse les 100 m et par un débit de 10 l/s. Selon l'agriculteur, l'eau de ce puits présente une salinité de 2.5 g/l (Figure 16).

L'agriculteur alterne les irrigations entre les eaux reçu du GDA et les eaux du puits afin de raccourcir le cycle.



Figure 16: Puits privé sur la parcelle d'un seul étage à El Barghouthia.

Afin de pouvoir évaluer les quantités d'eau fournis, on calcule la Réserve Utile (RU) et la Réserve Facilement Utilisable (RFU):

Tableau 3: Caractéristique de la rétention d'eau du sol de Massire 1

	Profondeur	Pfp (%)	Pfp (mm)	CC (%)	CC (mm)	RU	RFU
Massire 1	0-60 cm	4.1	24.6	9.2	55.2	30.6	15.3

Alors pour que l'absorption des eaux disponibles ne dépasse le seuil limite de la RFU, il faut que le cumul d'eau dans le sol soit toujours supérieur à ($CC - RFU = 39.9$ mm).

1.3 Suivi de l'état hydrique de la parcelle Massire 1

Pendant la période d'étude, allant du 1 novembre 2021 jusqu'au 6 avril 2024, la fréquence des irrigations dans la parcelle à un seul étage de l'oasis d'El Barghouthia n'a pas été régulières (Figure 17). En effet, les données enregistrées montrent que le tour d'eau moyen était de 8.5 jours, mais il pouvait s'étendre jusqu'à 36 jours révélant des variations importantes dans les périodes de stress hydrique auxquelles les palmiers dattiers sont exposés, ainsi qu'une gestion irrégulière de l'irrigation.

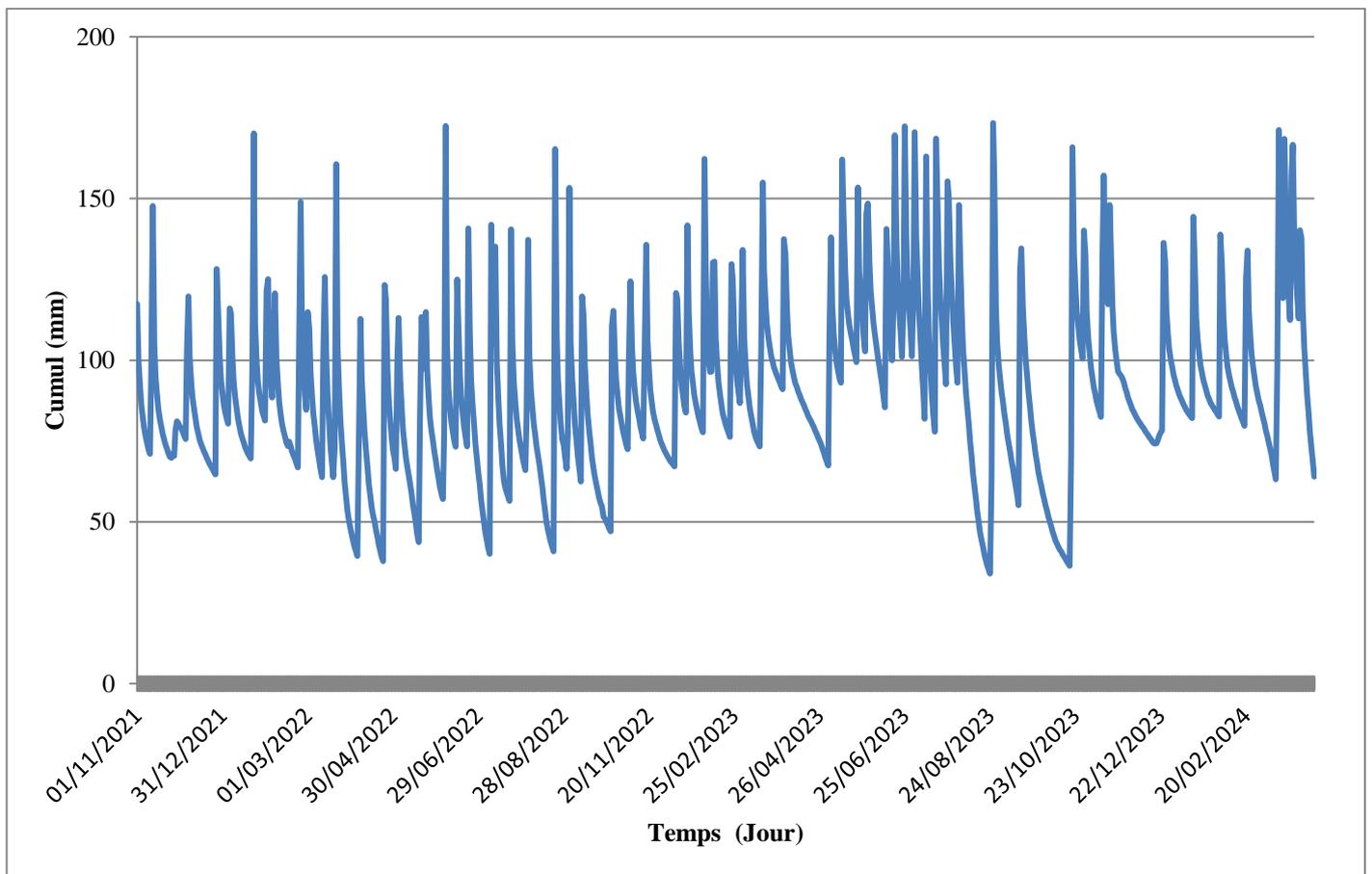


Figure 17: Courbe des irrigations de la parcelle Massire 1 d'El Barghouthia pour la période du 01-11-2021 jusqu'au 06-04-2024.

D'après les données enregistrées, le déclenchement des irrigations coïncident avec des humidités du sol qui variaient entre 32,39 mm et 114,16 mm. Selon les valeurs enregistrées, une irrigation permet de constituer un stock moyen de 179.96 mm au niveau de la cuve où la sonde est installée pour une durée d'irrigation moyenne de 01h 10 min.

Pendant la période d'étude, cette parcelle a enregistré un total de 63 irrigations, soit 28 irrigations en 2022, 28 irrigations en 2023 et 7 irrigations en 2024 (01/01/2024 jusqu'au 8/04/2024). Ces irrigations sont réparties sur les mois de l'année comme le montre la (figure 21).

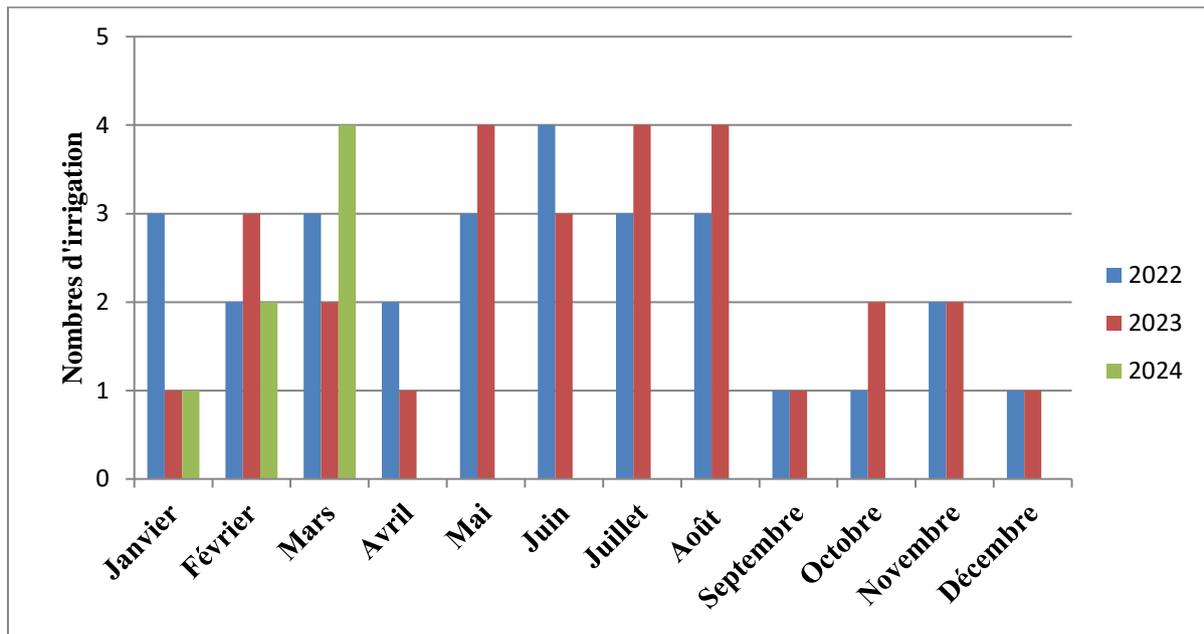


Figure 18: Nombre d'irrigations en chaque mois des années 2022- 2023- 2024 de Massire 1.

On observe une irrégularité dans la fréquence des irrigations en fonction des mois de l'année, ainsi qu'une variation interannuelle. Cette fréquence irrégulière des irrigations impacte directement la durée des tours d'eau durant chaque période.

Pendant toute la période d'étude, on remarque que pour les irrigations qui dépassent 1h, il y a formation d'un plateau de saturation aux différentes profondeurs du sol, ainsi qu'une infiltration rapide de l'eau (Figure 19). Ces deux phénomènes sont expliqués par une saturation des pores du sol et une capacité limitée de rétention d'eau. Il s'agit alors d'une période de sur-irrigation, où le sol se trouve au-delà de sa capacité au champ.

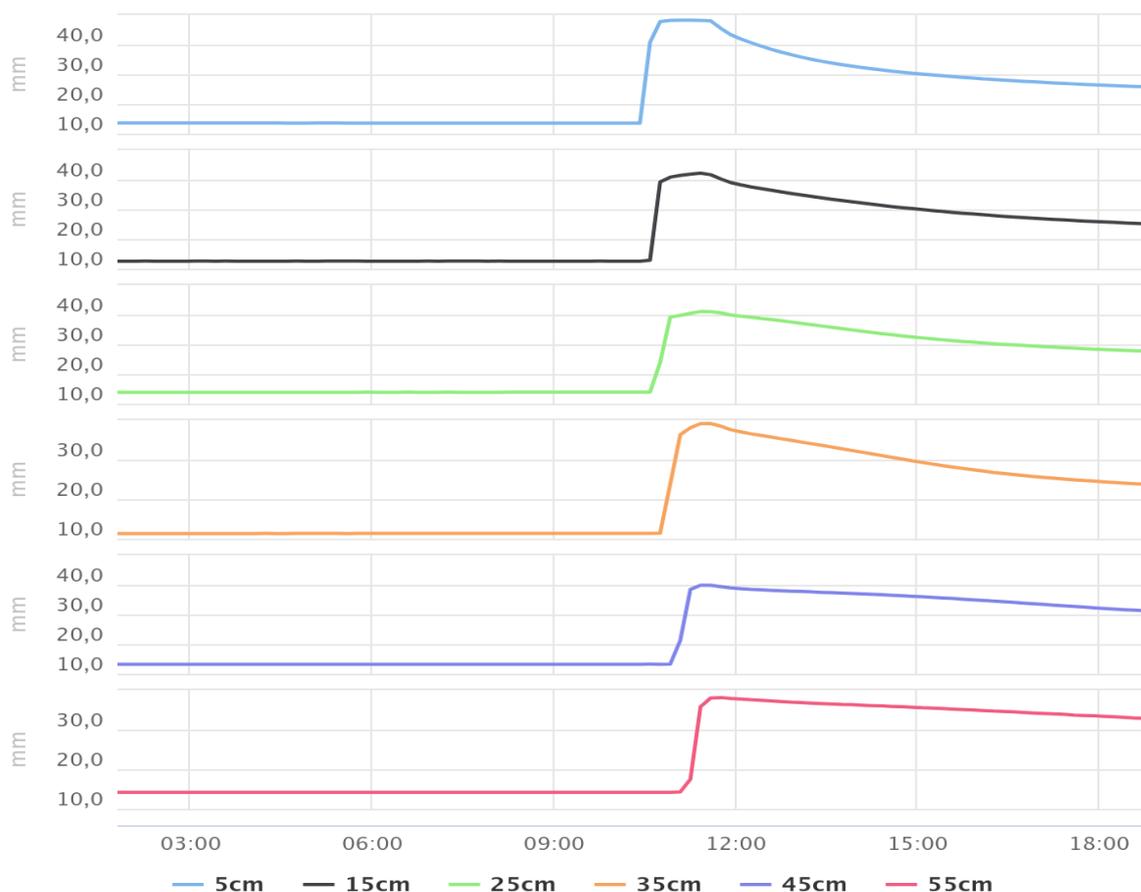


Figure 19: Exemple de l'évolution de l'humidité du sol pour 6 profondeurs après une irrigation le 24/12/2023 (Parcelle Massire 1)

Pour le cas du 4 février 2023, on a enregistré une irrigation d'une durée de 05h15 (Figure 20). Cette irrigation commence à 06h45 avec un S_i de 76.6mm et qui atteint un palier de saturation de 251.71mm à 7h55 soit après 1h10, mais qui ne s'arrête qu'à 12h soit une sur irrigation de 04h05.

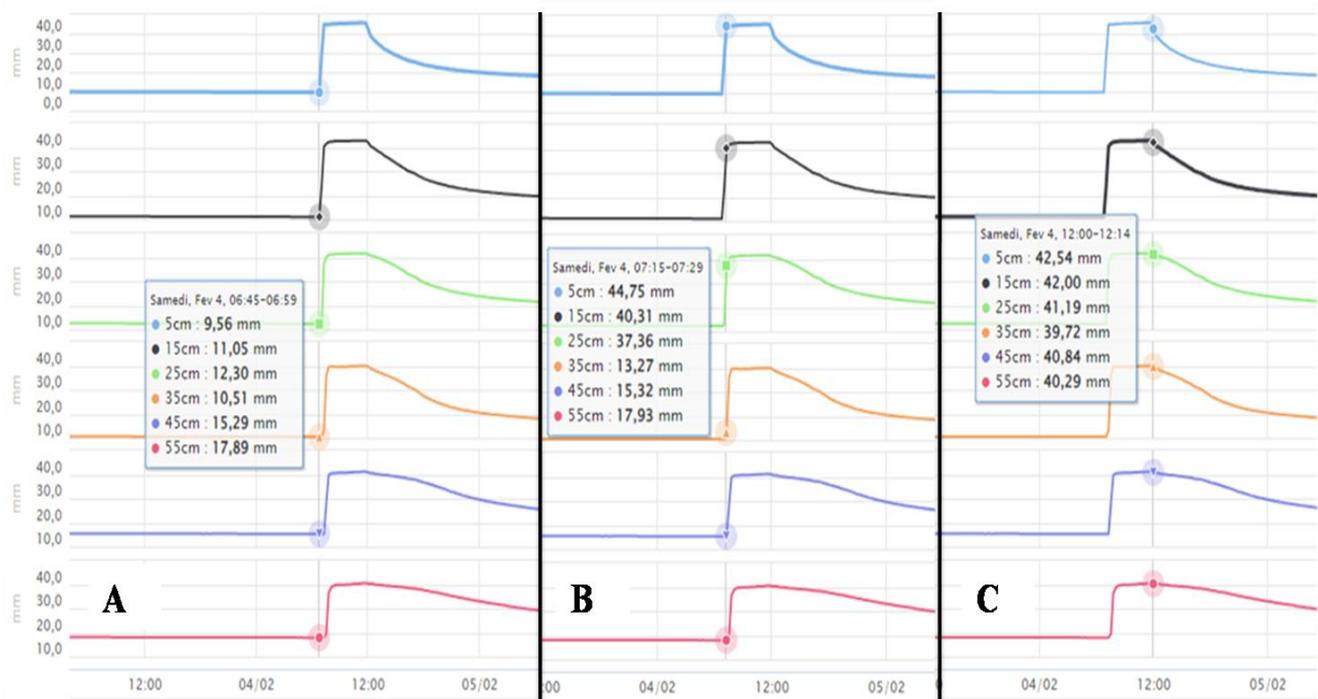


Figure 20: Evolution de l'humidité lors de l'irrigation du 04 /02/2023 sur les 6 profondeurs du sol ; A : Etat du sol au moment du déclenchement de l'irrigation ; B : Etat du sol au moment du début de la sur-irrigation ; C : Etat du sol à l'arrêt de l'irrigation

Prenant l'exemple du mois d'août 2023, caractérisé par des températures élevées. Seulement 3 irrigations sont enregistrées. La première irrigation du 2 août 2023 commence par un stock initial de 89.08 mm accumulant 167.23 mm passant ainsi à un stock final de 256.31mm (Figure 21).

Cependant, le retour au S_i se fait en 5 jours, alors que la prochaine irrigation n'est déclenchée que le 26 août 2023 avec un stock d'eau de 34.41 mm, soit un tour d'eau de 24jours.

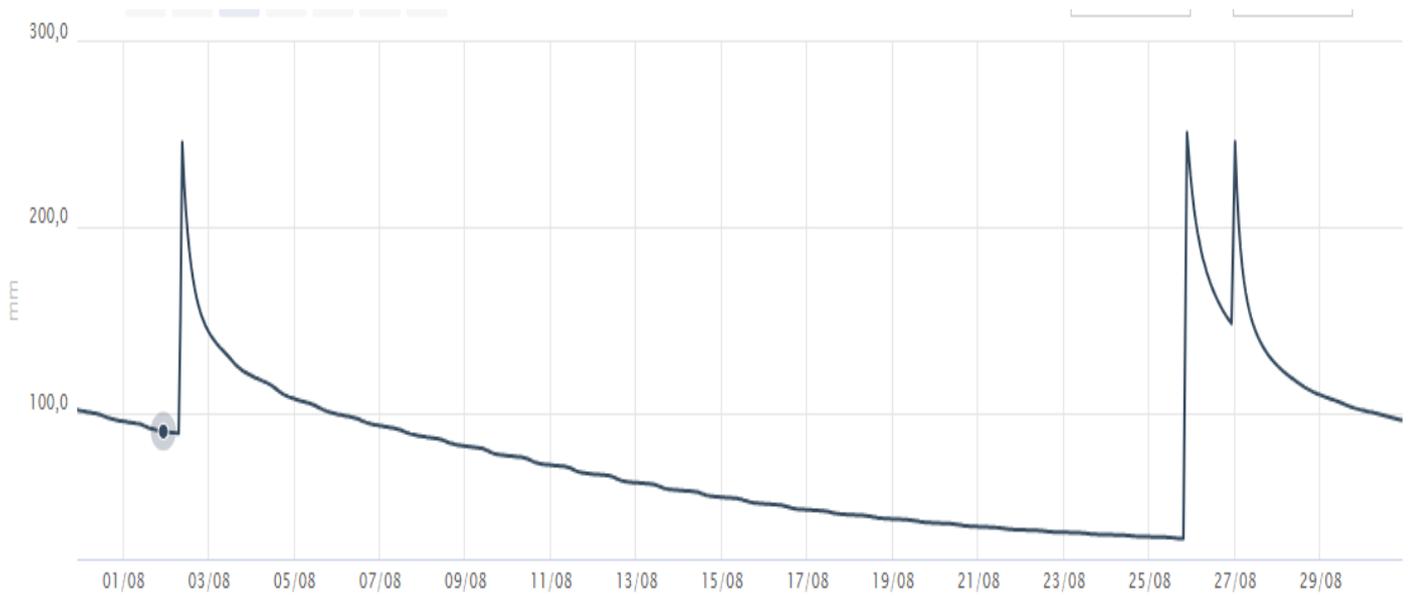


Figure 21: Les irrigations mois d’août 2023 (Parcelle Massire1)

Selon le cycle phénologique décrit par l’agriculteur de la parcelle de Kebili, le tableau 4 détaille la répartition des irrigations.

Les irrigations sont principalement faites durant les phases de floraison et pollinisation ainsi que la phase de grossissement des fruits. Il faut mettre l’accent sur la durée maximale du tour d’eau, où on note un maximum de 36 jours pendant la phase de maturation en 2023. Cette période de sécheresse influence directement la qualité organoleptique des dattes.

D’après les données enregistrées, après l’irrigation du 06/04/2022 qui aboutit à un S_f de 246.48 mm, le stock d’eau atteint un niveau de 38.37 qui dépasse le seuil limite de la RFU en 15 jours.

Après une irrigation le 22/06/2022 avec un S_f de 257.72 mm, le stock d’eau de la RFU est épuisé au bout de 15 jours

Après une irrigation le 02/08/2023 créant un $S_f=256.31$ mm, la RFU atteint sa limite après 14 jours.

Tableau 4: Nombre des irrigations et les tours d'eau en fonction des stades phénologique du palmier dattier sur la parcelle Massire 1.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Jun	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
	Repos végétatif		Floraison et pollinisation			Grossissement des fruits		Maturation		Récolte		
Nb d'irrigation 2022	5		8			7		5		3		
Tour d'eau 2022	Moyen	Max	Moyen	Max	Moyen	Max	Moyen	Max	Moyen	Max		
	10	16	12	18	10	16	13	21	13	22		
Nb d'irrigation 2023	4		7			7		7		3		
Tour d'eau 2023	Moyen	Max	Moyen	Max	Moyen	Max	Moyen	Max	Moyen	Max	Moyen	Max
	10	13	13	30	8	14	14	36	14	38		
Nb d'irrigation 2024	3		4									
Tour d'eau 2024	Moyen	Max	Moyen	Max								
	19	21	10	22								

1.4 Parcelle à trois étages à Barghouthia : Massire 2

Cette parcelle est située dans le village de Barghouthia et appartient au Groupement de Développement Agricole (GDA) Alitkan. C'est une parcelle 3.5ha dont 0.5ha qui appartient au PPI et 3ha en extension privée. L'oasis présente une structure en trois étages, avec plus que 400 pieds de palmiers dattiers avec une majorité de la variété « Deglet Nour », âgés de 3 à 34 ans. On y trouve également des variétés communes telles que « Alig » et « Rtob », ainsi que deux pieds mâles par hectare. De plus, l'oasis abrite une diversité d'espèces arboricoles, y compris des agrumes, des abricotiers, des vignes, des pêchers, des figuiers, des oliviers, des grenadiers et des pommiers. Une variété de cultures maraîchères est également présente, incluant des oignons, de l'ail, des tomates, des pommes de terre et des légumes-feuilles.



Figure 22: Parcelle de trois étages de l'oasis d'El Barghouthia.

La parcelle n'a pas de structure homogène ; c'est une oasis traditionnelle. Elle est équipée par un système d'irrigation en cuves individuelles qui sont interconnectées par des sillons (Figure 23).



Figure 23: Système d'irrigation en cuve individuelle ininterconnectées par des scillons dans la parcelle à trois étages.

En plus du tour d'eau fourni par le GDA, qui est de 22 jours, cette parcelle est alimentée par deux puits privés qui sont utilisées pour l'irrigation des 3ha en extension aussi bien que l'irrigation du 0.5ha du PPI. Le premier puits est de 100m de profondeur alors que le deuxième est de 160m (Figure 23).



Figure 24: Les deux puits privés de la parcelle à trois étages.

Afin de pouvoir évaluer les quantités d'eau fournis, on calcule la Réserve Utile (RU) et la Réserve Facilement Utilisable :

Tableau 5: Caractéristique de la rétention d'eau du sol de Massire 2

	Profondeur	Pfp (%)	Pfp (mm)	CC (%)	CC (mm)	RU	RFU
Massire 2	0-60 cm	4.7	28.2	10.2	61.2	33	16.5

Alors, pour que l'absorption des eaux disponibles ne dépasse pas le seuil limite de la RFU, il faut que le cumul d'eau dans le sol soit toujours supérieur à ($CC - RFU = 44.7\text{mm}$).

1.4. Suivi de l'état hydrique de la parcelle Massire 2

Pour la même période d'étude, allant du 1 novembre 2021 jusqu'au 6 avril 2024, la fréquence des irrigations dans la parcelle de trois étages d'El Barghouthia présente plus d'irrégularité que la première parcelle (Figure 25). En effet, selon les données de la sonde, le tour d'eau moyen était de 10 jours, alors qu'il a atteint un maximum de 53 jours. Cet écart indique l'irrégularité des tours d'eau.

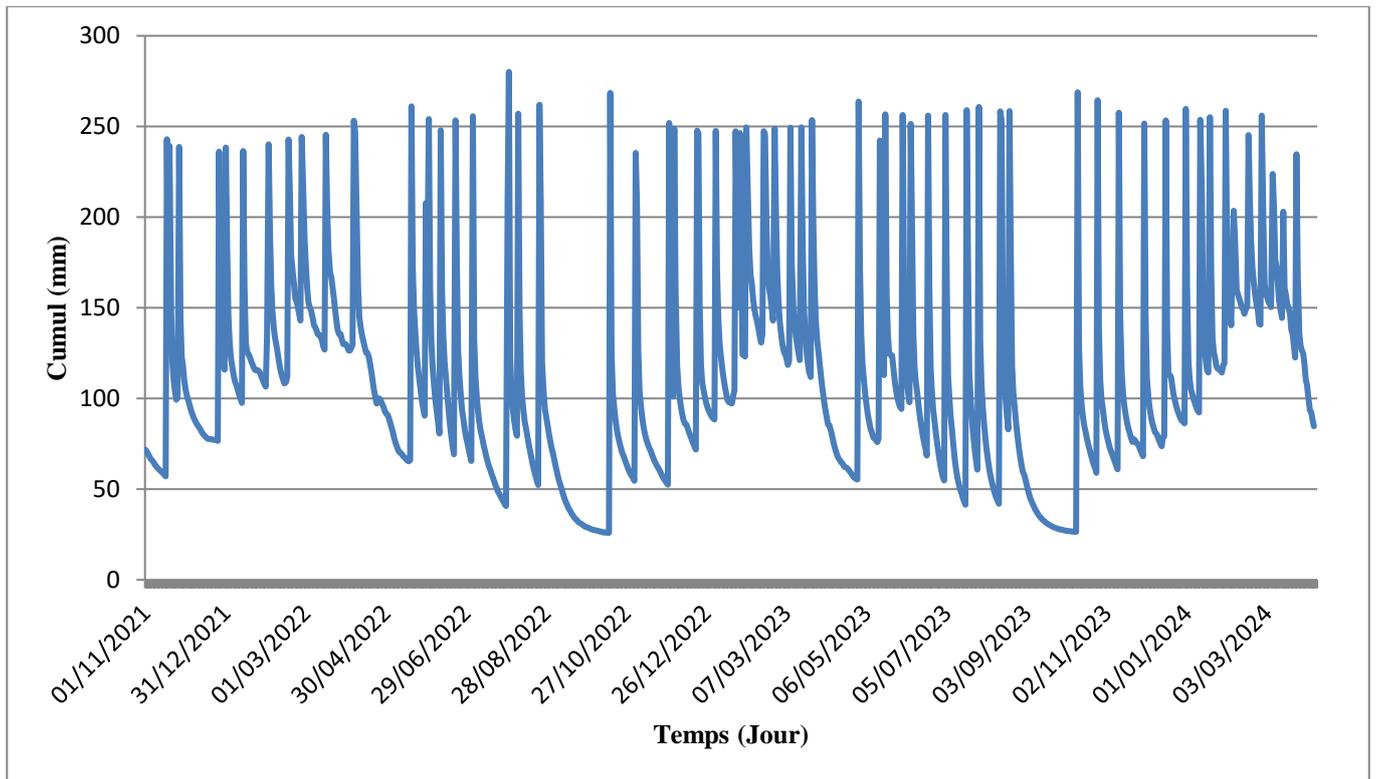


Figure 25: Courbe des irrigations de la parcelle Massire 2 d'El Barghouthia pour la période du 01-11-2021 jusqu'au 06-04-2024.

D'après les données enregistrées, le déclenchement des irrigations coïncident avec des humidités du sol qui variaient entre 25.8 mm et 152.25 mm. Les niveaux maximaux du cumul d'eau dans le sol s'élevaient à 248.99mm.

Pendant la période d'étude, cette parcelle a enregistré un total de 59 irrigations, soit 23 irrigations en 2022, 26 irrigations en 2023 et 10 irrigations en 2024 (01/01/2024 jusqu'au 8/04/2024). Ces irrigations sont réparties sur les mois de l'année comme le montre la (figure 26).

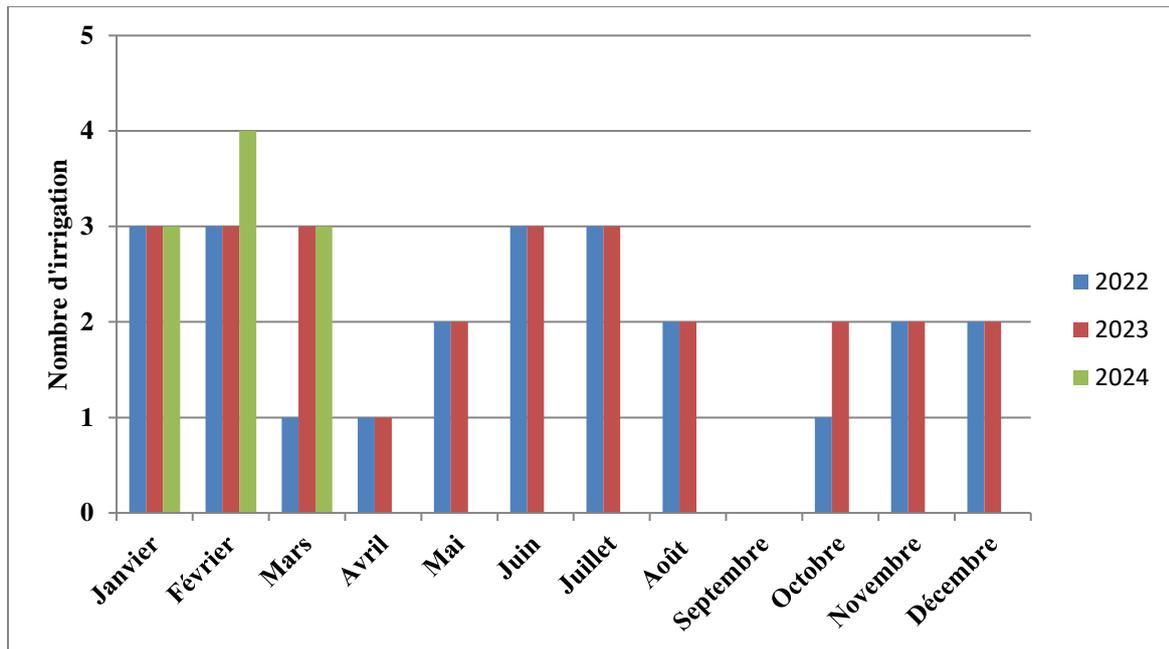


Figure 26: Nombre d'irrigations en chaque mois des années 2022- 2023- 2024 de Massire 2.

Sur cette parcelle, on observe une régularité interannuelle du nombre d'irrigation par mois. On remarque l'absence d'irrigation pendant le mois de septembre pour les deux années 2022 et 2023. Cette longue période de sécheresse affecte les qualités organoleptiques des fruits.

La formation des plateaux de saturation sur les différentes profondeurs ainsi que la percolation rapide de l'eau sont également observées dans cette parcelle (Figure 27).

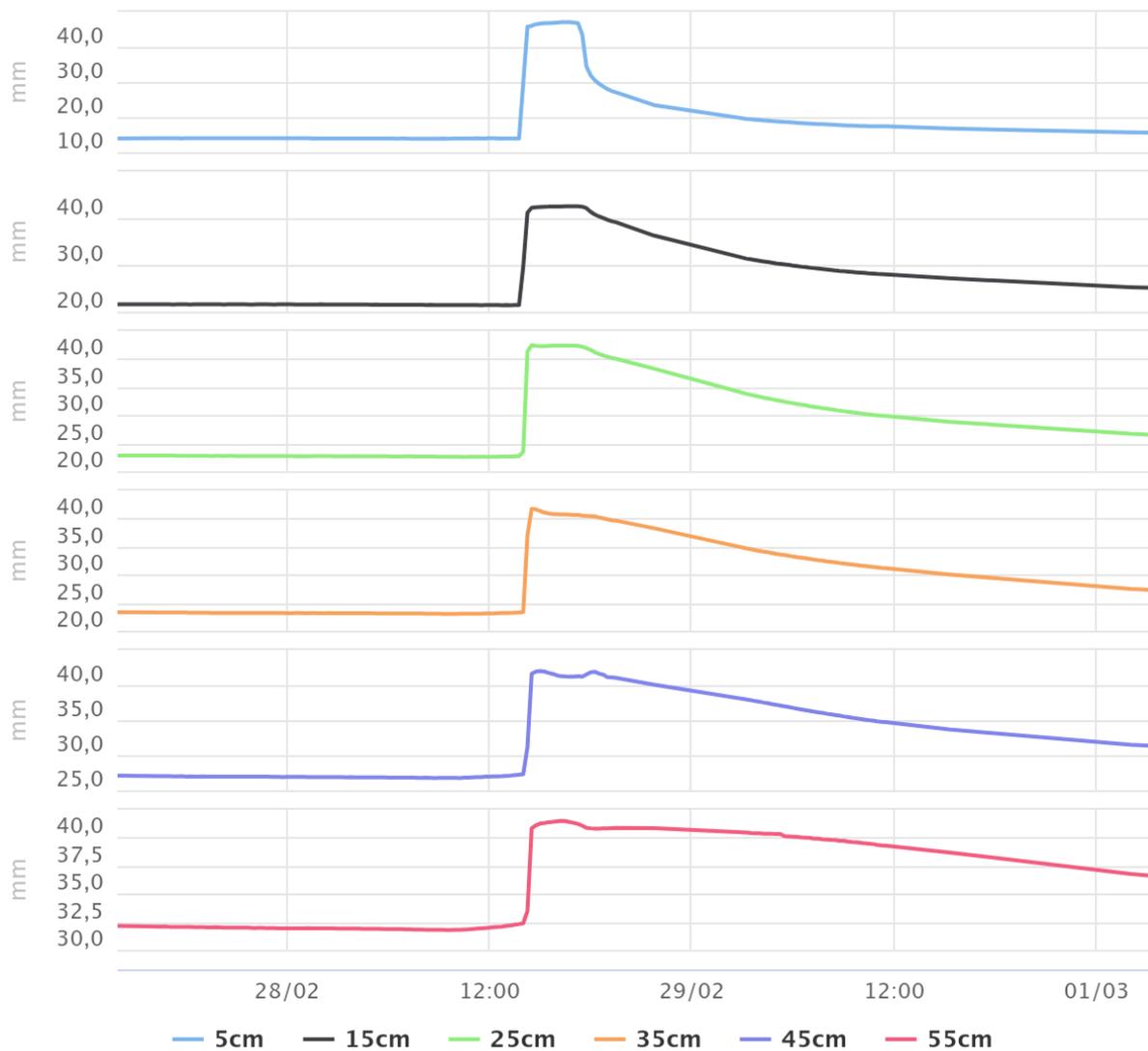


Figure 27: Evolution de l'humidité du sol pour 6 profondeurs après une irrigation du 28/02/2024 au sein de la parcelle Massire 2

Pour le cas du 04 juillet 2023, on observe, sur les 6 profondeurs du sol, une irrigation d'une durée de 02 h30 (Figure 28). Cette irrigation a commencé à 14h50 avec un S_i de 51.17mm et qui atteint un palier de saturation de 256.38mm à 15h20 soit après 30 minutes, mais qui ne s'arrête qu'à 17h20h soit une sur-irrigation de 02h.

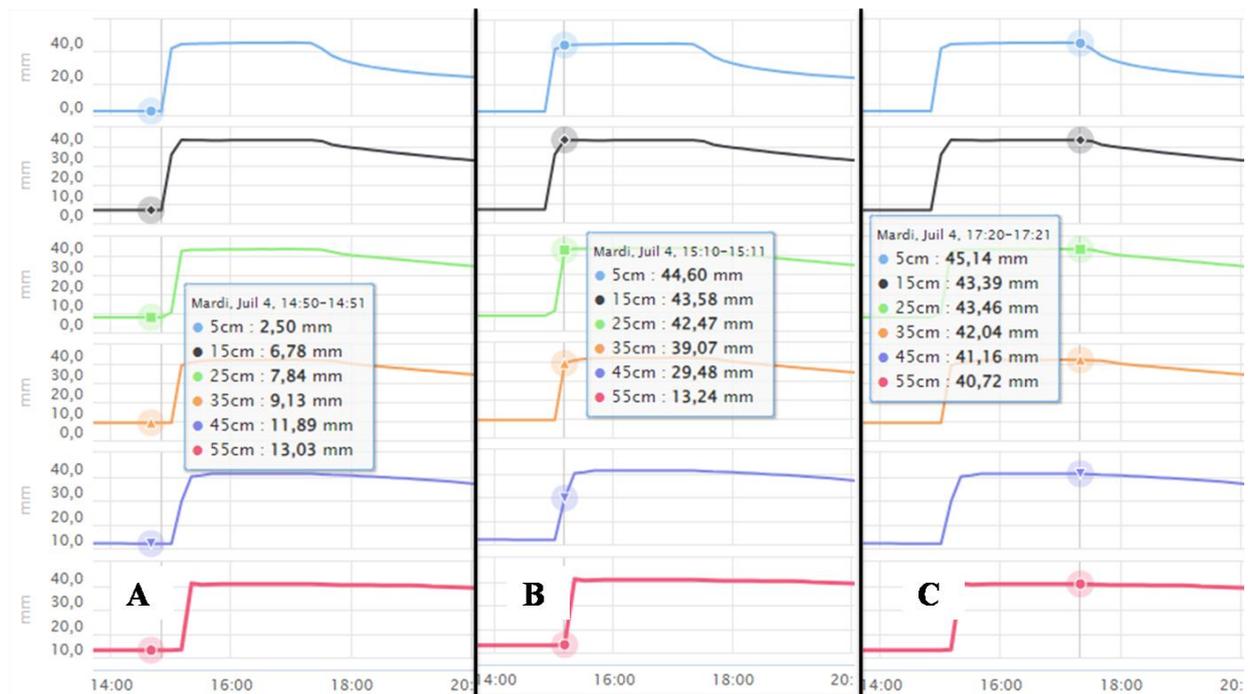


Figure 28: Evolution de l'humidité lors d'une irrigation le 04 /07/2023 sur les 6 profondeurs du sol ; A : Etat du sol au moment du déclenchement de l'irrigation ; B : Etat du sol au moment du début de la saturation ; C : Etat du sol à l'arrêt de l'irrigation.

En étudiant le cas de la période allant du 20 août 2023 jusqu'au 14 octobre 2023 (Figure 29), on remarque que seulement deux irrigations sont enregistrées avec un tour d'eau de durée de 51 jours. Après une irrigation faite le 21/08/2023, où le S_i du sol a été déjà inférieur à la RFU, le sol est à un cumul de 258.54 mm. L'épuisement de la RFU se fait en seulement 15 jours, alors que l'irrigation suivante n'est effectuée que le 11 octobre 2023 créant ainsi une période de stress hydrique de 36 jours.

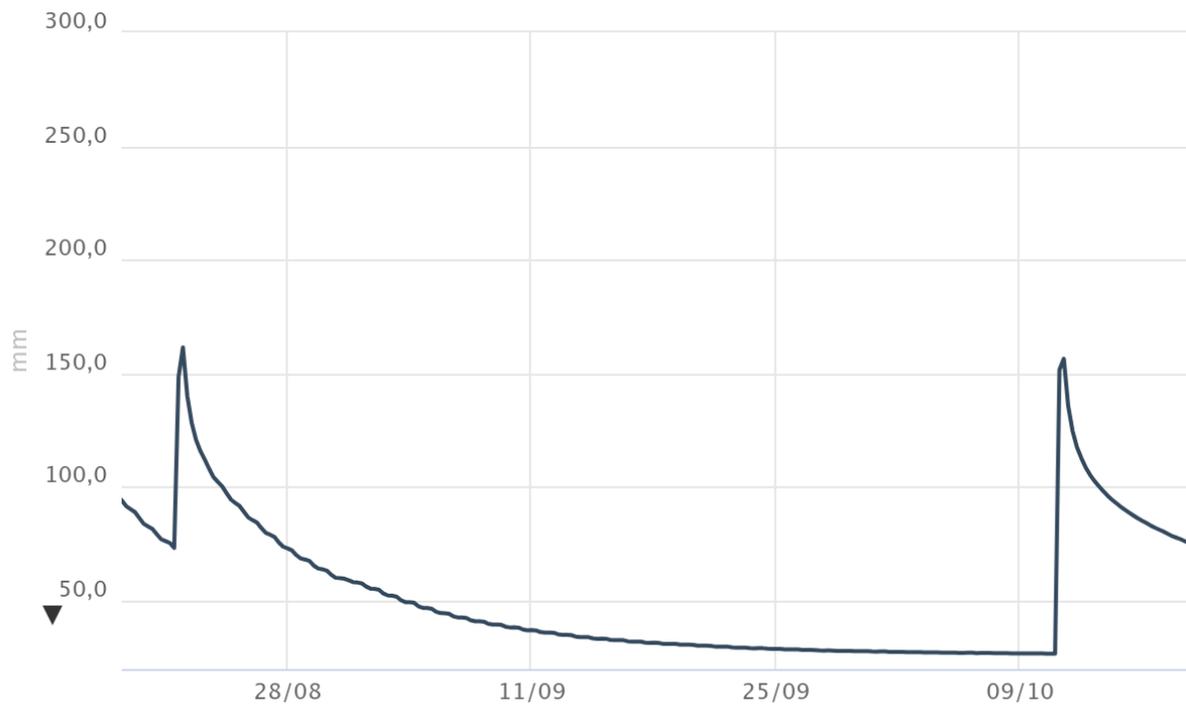


Figure 29: Les irrigations pendant la période du 20/08/2023 jusqu'au 14/10/2023 au sein de la parcelle Massire 2

Selon le cycle phénologique décrit par l'agriculteur de la parcelle, le tableau 6 détaille la répartition des irrigations. On remarque une irrigation excessive pendant la période du repos végétatif avec des tours d'eau raisonnables (9 à 15 jours) alors qu'en périodes critiques tel que les périodes de floraison et pollinisation ainsi que la période de maturation des fruits, le nombre d'irrigation est faible par rapport aux autres périodes et les tours d'eau dépassent les 30 jours allant jusqu'à 51 et 53 jours.

D'après les données enregistrées, après l'irrigation du 04/07/2023 qui crée un S_f de 256.39 mm, le stock d'eau atteint un niveau de 43.07 < RFU en 12 jours.

Après l'irrigation du 21/08/2023 aboutissant à un $S_f = 258.54$ mm, la RFU est épuisée au bout de 14 jours.

Tableau 6 : Nombre des irrigations et les tours d'eau en fonction des stades phénologique du palmier dattier sur la parcelle Massire 2.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
	Repos végétatif		Floraison et pollinisation			Grossissement des fruits		Maturation			Récolte	
Nb d'irrigation 2022	6		4			6		3			4	
Tour d'eau 2022	moyenne	Max	Moyenne		Max	Moyenne	Max	Moyenne		Max	Moyenne	Max
	12	15	19		43	15	27	25		53	16	25
Nb d'irrigation 2023	6		6			6		4			4	
Tour d'eau 2023	moyenne	Max	Moyenne		Max	Moyenne	Max	Moyenne		Max	Moyenne	Max
	9	15	12		35	11	16	22		51	14	16
Nb d'irrigation 2024	7		3									
Tour d'eau 2024	moyenne	Max	Moyenne		Max							
	9	12	10		14							

2. L'Oasis de Kaabi

2.1 Stratégie du GDA Kaabi

L'oasis d'El Kaabi est une ancienne oasis qui fait partie d'un PPI où l'eau d'irrigation est entièrement gérée par GDA El Kaabi. Avant le changement de la stratégie de gestion de l'irrigation à la fin de l'année 2023, les agriculteurs de ce PPI paient les frais d'irrigation par trimestre à raison de 8h par 1 ha, sans garantir les quantités ou le nombre de passages de l'eau par leur parcelle. Après des problèmes avec la STEG et la Caisse nationale de l'Assurance Maladie (CNAM), le bureau du GDA a décidé de changer de stratégie et de définir un prix horaire pour l'eau, donc il faut réserver et payer ses heures pour faire partie du tour d'eau. L'oasis dispose de deux puits : premier forage à un débit de 18 l/s alimente le secteur 1, alors que le deuxième forage à un débit de 44 l/s est récupéré dans une bêche à eau et divisé sur les secteurs 2 et 3 avec 22 l/s pour chacun. La distribution de l'eau est faite par secteur (Figure alors chaque secteur à son propre tour d'eau en fonction de la demande et des superficies. L'eau n'est pas disponible tout au long de la journée, Car il n'y a pas de main d'œuvre pour gérer les vannes pendant la nuit. Le tour d'eau actuel après changement de stratégie varie entre 30 et 35 jours. Au fait, puisque le débit des deux sondages du GDA a diminué, la stratégie était de compenser cette diminution en doublant le nombre d'heure d'irrigation sans pourtant augmenter le prix de ces heures supplémentaires, ce qui a créé le problème des dettes et l'élongation du tour d'eau. D'où le changement de la stratégie de gestion.

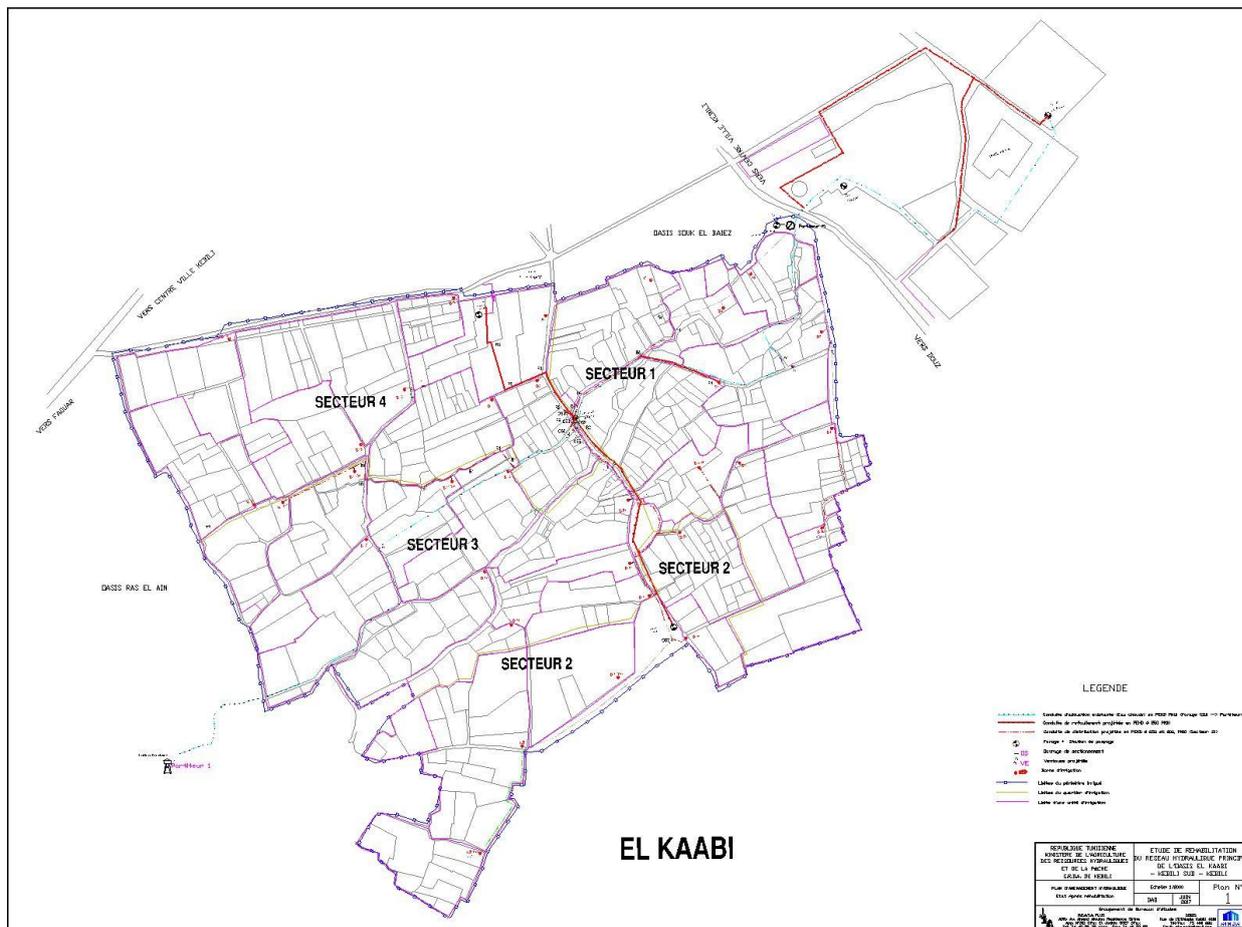


Figure 30 : La répartition de l’oasis d’El Kaabi par secteurs.

2.2 Parcelle à un seul étage Kaabi 1

La parcelle est située dans l’oasis de Kaabi et appartient au GDA Kaabi. C’est une parcelle de plus que 0.5ha avec 50 pieds de palmiers dattiers adultes et 35 jeunes. On note une dominance de la variété Deglet Nour, avec la présence de quelques pieds de Ftameya, Fazzeni, Hessa et un seul pied male. On y trouve également de l’arboriculture mais non développée comme les vignes, les grenadiers, les figuiers et les pêchers (Figure 31-A) Cette parcelle se distingue par la présence continue de luzernes sous chaque palmier dattier. La sonde est bien installée sous un palmier dattier et couverte par la luzerne (Figure 31-B).

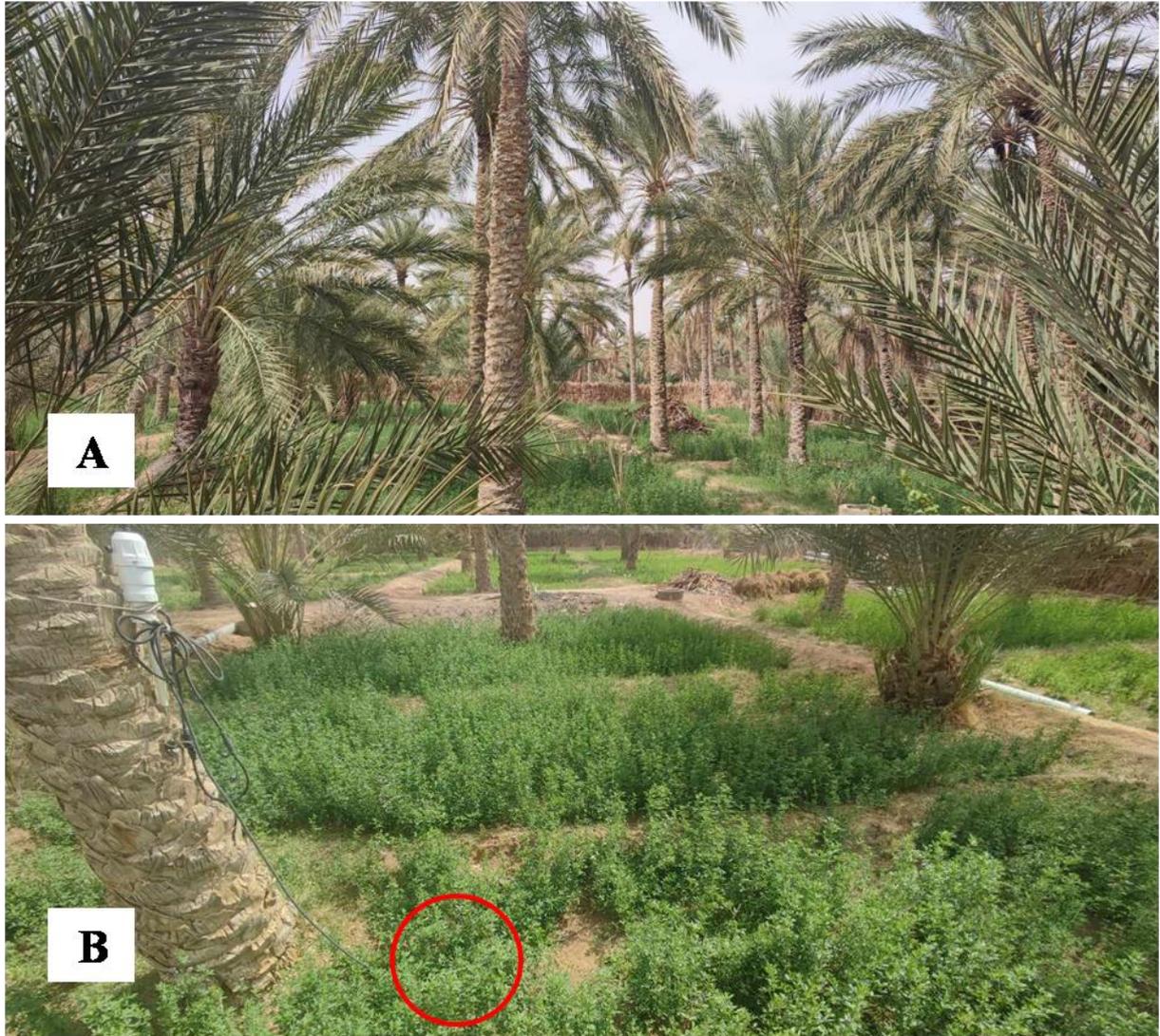


Figure 31: A : La parcelle à un étage Kaabi 1 ; B : Emplacement de la sonde capacitive dans la parcelle Kaabi 1.

Cet agriculteur dispose d'un sondage de 102 m de profondeur. Il alternait entre l'eau du GDA et sa propre source diminuant le tour d'eau à 15 jours.

Le système d'irrigation adopté c'est l'irrigation par submersion des cuves. Le passage de l'eau d'une cuve à une autre se fait par l'ouverture manuelle lors de l'irrigation d'un sillon entre les cuves.

Afin d'évaluer les quantités d'eau fournies, nous calculons la Réserve Utile (RU) et la Réserve Facilement Utilisable (RFU).

Tableau 7: Caractéristiques de la rétention d'eau du sol de Kaabi 1.

	Profondeur	Pfp (%)	Pfp (mm)	CC(%)	CC (mm)	RU (mm)	RFU (mm)
Kaabi 1	0-60cm	8.6	51.6	15.1	90.6	39	19.5

Ainsi, pour éviter que l'absorption d'eau disponible dépasse le seuil limite de la RFU, il est nécessaire que le cumul d'eau dans le sol soit toujours supérieur à $(CC-RFU = 71.1 \text{ mm})$.

2.3. Suivi de l'état hydrique de la parcelle Kaabi 1

Pour la période d'étude, allant du 9 mars 2023 jusqu'au 6 avril 2024, la fréquence des irrigations dans la parcelle Kaabi 1 présente une irrégularité au niveau de la fréquence ainsi que la dose d'irrigation (Figure 32). Le tour d'eau a atteint un maximum de 68 jours pendant la période allant du 12 octobre 2023 jusqu'au 19 décembre 2023. Alors que la moyenne sur toute la période d'étude est de 14 jours.

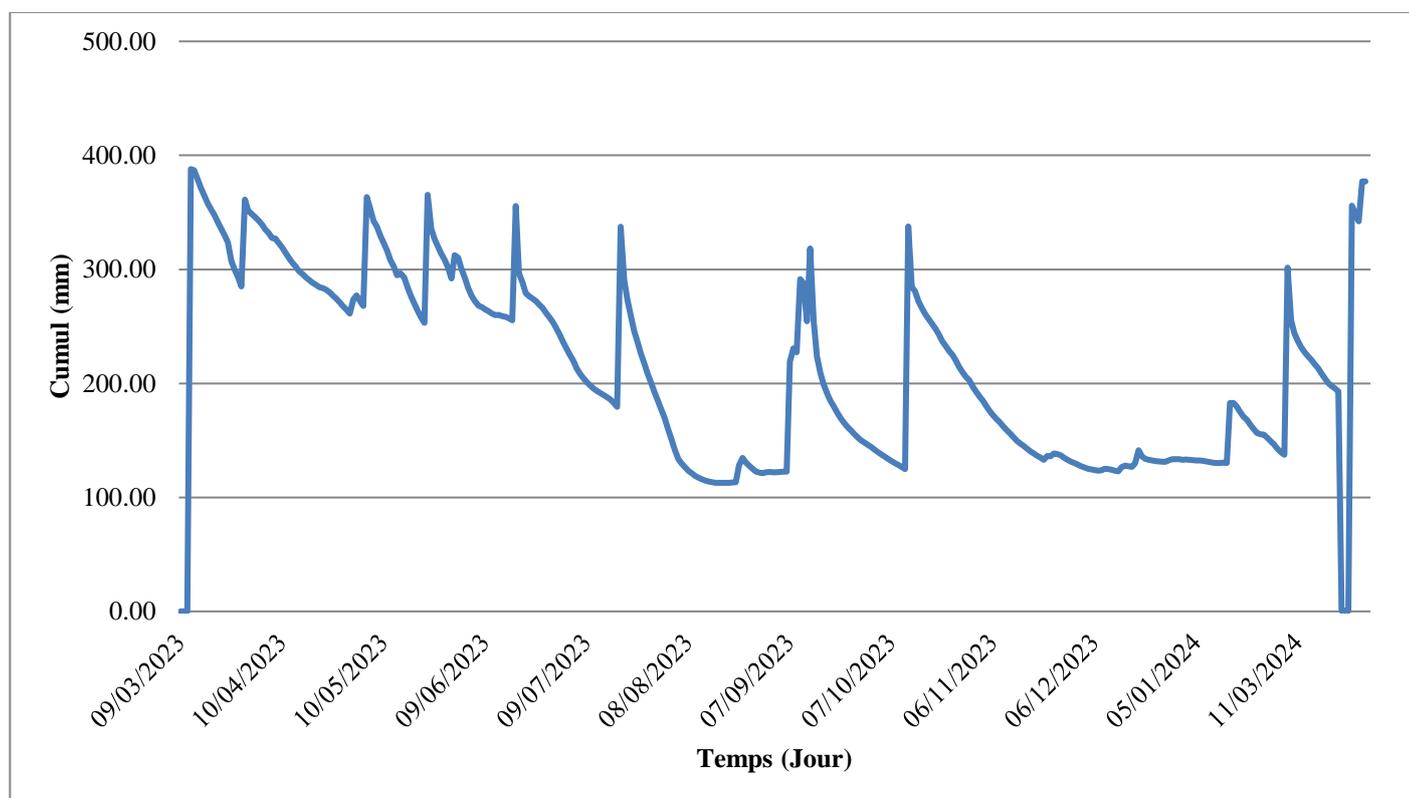


Figure 32 : Courbe des irrigations de la parcelle Kaabi 1 pour la période du 09-03-2023 jusqu'au 06-04-2024

Pendant la période d'étude allant du 14/03/2023 au 08/04/2024, cette parcelle a enregistré un total de 19 irrigations, soit 14 irrigations en 2023 et 5 irrigations en 2024. Ces irrigations sont réparties sur les mois de l'année comme le montre la (figure 33).

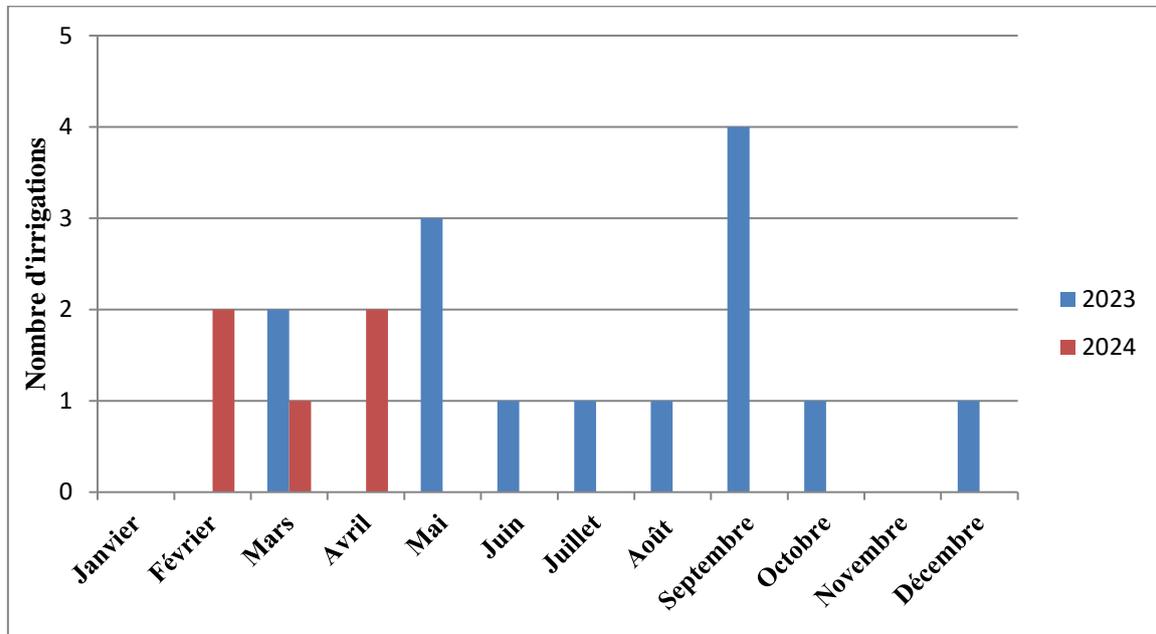


Figure 33: Nombre d'irrigations en chaque mois des années 2023- 2024 de Kaabi 1

Bien que les taux d'humidité du sol soient élevés tout au long de l'année, cela ne peut pas être attribué à l'irrigation, étant donné que le nombre d'irrigations est généralement d'une irrigation par mois et que certaines périodes l'irrigation est complètement absente. Ce qui pose la question de la source de cette humidité et de sa persistance.

La figure 34 montre que, à partir du 24 Août 2023, on voit une baisse de la teneur en eau observée principalement en couches superficielles. Par contre en profondeur, la teneur en eau remonte lentement, ceci peut être dû à l'effet d'une remontée capillaire d'eau.

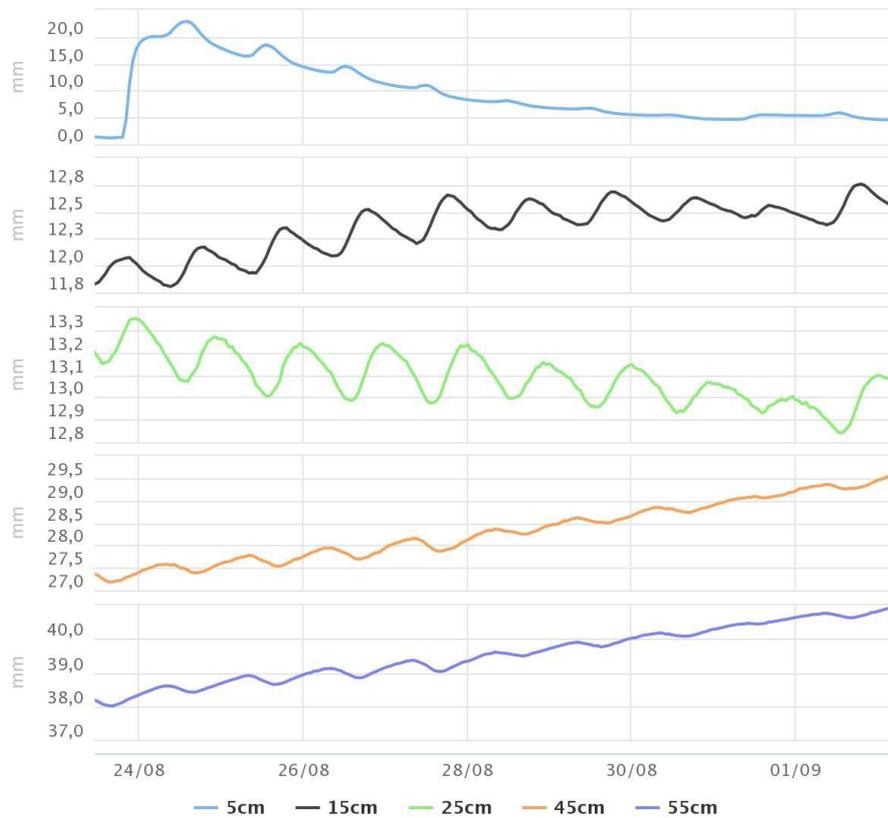


Figure 34: L'humidité du sol montrant une remonté de la nappe au sein de la parcelle Kaabi 1.

D'après les données de la sonde, les irrigations étaient déclenchées lorsque l'humidité du sol était comprise entre 112.35 mm et 285.07 mm. On remarque que cette parcelle présente des taux d'humidité élevés, comme exemple, le stock minimal enregistré est de 112.35 mm, alors que le tour d'eau atteint un maximum de 68 jours. Ce qui peut suggérer que la gestion de l'eau au sein de cette parcelle n'est pas aussi déficiente et que la situation hydrique n'est pas aussi critique par rapport aux autres cas étudiés. Cependant, cette constatation ne nie pas l'irrégularité de la gestion de l'irrigation qui pourrait potentiellement nuire à la végétation présente pour les années prochaines.

Prenant le cas du 08 mars 2024, l'irrigation a duré 2h avec une saturation au bout de 30 min du début .Cette irrigation commence à 02h00 avec un S_i de 134.19mm et qui atteint un palier de saturation de 301.43mm à 02h30, mais qui ne s'arrête qu'à 04h00 soit une sur irrigation de 01h30. Ceci montre que, même avec des taux d'humidité élevés la parcelle subit toujours une sur-irrigation (Figure 35).

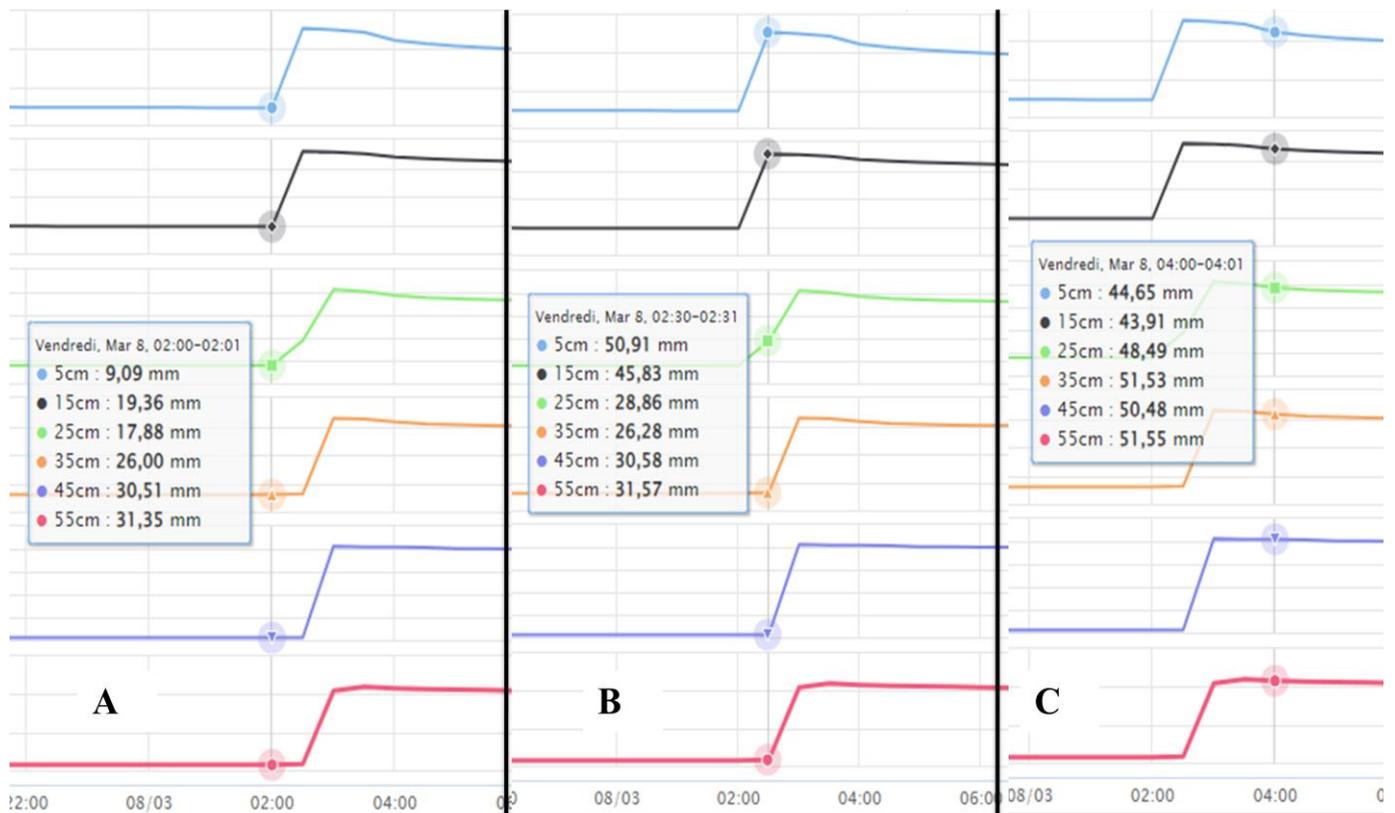


Figure 35: Evolution de l'humidité lors d'une irrigation le 08 /03/2024 sur les 6 profondeurs du sol ; A : Etat du sol au moment du déclenchement de l'irrigation ; B : Etat du sol au moment du début de la saturation ; C : Etat du sol à l'arrêt de l'irrigation

Le tableau 8 résume la répartition des irrigations et la durée des tours d'eau selon le cycle phénologique décrit par l'agriculteur de cette parcelle. On remarque que les irrigations sont limitées pendant la phase de grossissement des fruits, qui est une phase critique car elle influence la taille et le poids des régimes. De plus, on note un début de stabilisation du tour d'eau en 2024 avec une moyenne de 19 jours, comparé à une fluctuation des tours d'eau en 2023 qui varient de 13 à 68 jours.

Comme mentionné précédemment, le taux minimal enregistré par la sonde est de 112.35 mm. Alors que le seuil au dessous duquel les plantes entrent dans la réserve difficilement utilisable et peuvent subir un stress hydrique est 71.1mm. Par conséquent, cette parcelle n'a pas subi de stress hydrique.

Tableau 8: Nombre des irrigations et les tours d'eau en fonction des stades phénologique du palmier dattier sur la parcelle Kaabi 1.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
	Repos végétatif		Floraison et pollinisation			Grossissement des fruits		Maturation			Récolte	
Nb d'irrigation 2023	N/A		5			2		6			1	
Tour d'eau 2023	moyenne	Max	Moyenne		Max	Moyenne	Max	Moyenne		Max	Moyenne	Max
	N/A	N/A	13		32	25	31	17		36	68	68
Nb d'irrigation 2024	2		3									
Tour d'eau 2024	moyenne	Max	Moyenne		Max							
	20	20	18		19							

2.4 Parcelle à un seul étage à El Kaabi 2

La parcelle est située dans l'oasis de Kaabi et est gérée par le GDA Kaabi. Elle a une dominance de la variété Deglet Nour avec 70 pieds et ne compte que 8 pieds de variétés communes. On y trouve aussi quelques jeunes arbres fruitiers avec 3 grenadiers, 2 vignes et un olivier (Figure 36). Cette parcelle se distingue par la présence d'un couvert végétal. La sonde est installée sous un palmier dattier et entourée par des adventices.



Figure 36: La parcelle d'El Kaabi 2.

Cette parcelle est équipée d'un puits de surface de 22m à une salinité de 5.4 g/l.

Afin d'évaluer les quantités d'eau fournies, nous calculons la RU et la RFU.

Tableau 9:Caractéristiques de la rétention d'eau du sol de Kaabi 2.

	Profondeur	Pfp (%)	Pfp (mm)	CC(%)	CC (mm)	RU (mm)	RFU (mm)
Kaabi 1	0-60cm	8	48	14.3	85.8	37.8	18.9

Ainsi, pour éviter que l'absorption d'eau disponible dépasse le seuil limite de la RFU, il est nécessaire que le cumul d'eau dans le sol soit toujours supérieur à $(CC-RFU= 66.9 \text{ mm})$.

2.5. Suivi de l'état hydrique de la parcelle Kaabi 2

Pour la période d'étude de la parcelle d'El Kaabi 2, allant du 9 mars 2023 jusqu'au 6 avril 2024, on note que la fréquence des irrigations dans cette parcelle suit un tour d'eau de moyenne 12.5 jours, mais qui peut également atteindre 46 jours. (Figure 37).

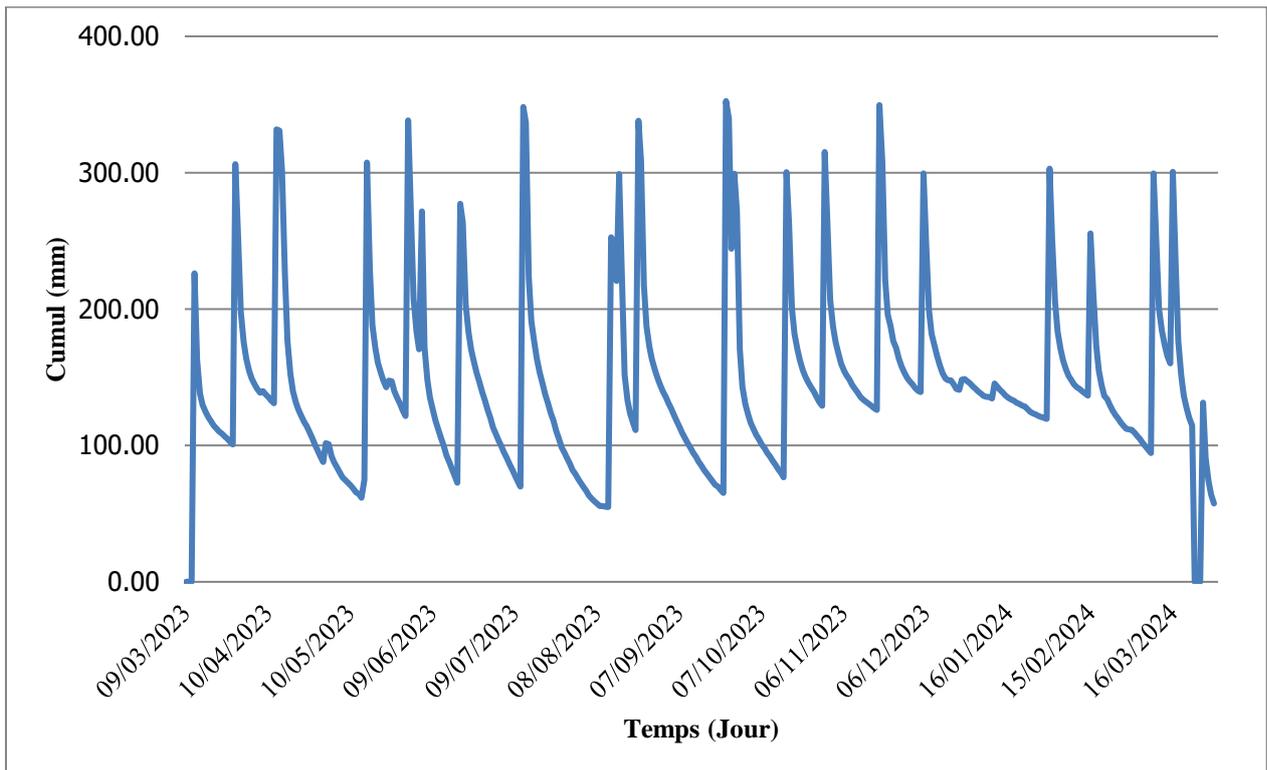


Figure 37: Courbe des irrigations de la deuxième parcelle d'El Kaabi pour la période du 09-03-2023 jusqu'au 06-04-2024.

D'après les données de la sonde, le déclenchement des irrigations coïncide avec une humidité du sol dans l'intervalle de 54.38 mm et 198.05 mm.

Pendant la période d'étude allant du 14/03/2023 au 08/04/2024, cette parcelle a enregistré un total de 24 irrigations, soit 18 irrigations en 2023 et 6 irrigations en 2024. Ces irrigations sont réparties sur les mois de l'année comme le montre la (figure 38).

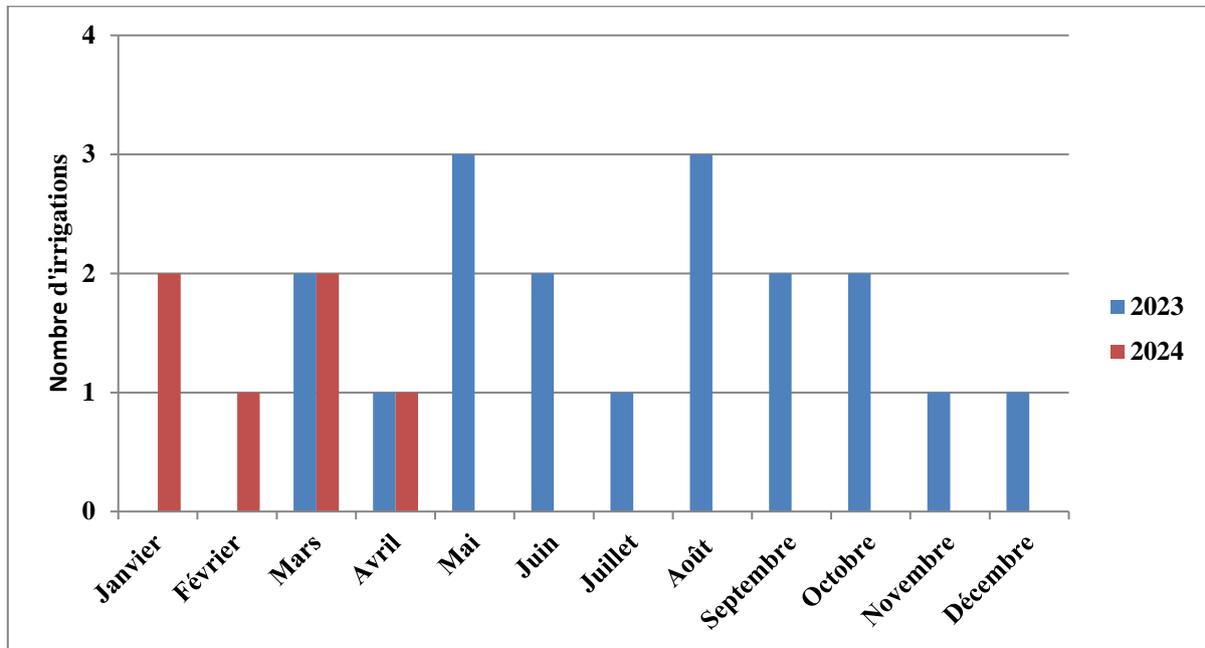


Figure 38: Nombre d'irrigations en chaque mois des années 2023- 2024 de Kaabi 2

Le nombre d'irrigation par mois varie entre 1 et 2, à l'exception des mois de mai et août, qui coïncident avec des périodes critiques nécessitant une plus grande quantité d'eau. Durant ces mois, 3 irrigations ont été enregistrées respectivement.

Pour cette parcelle on remarque que les périodes de sur-irrigation diminuent de l'année 2023 à l'année 2024. Au cours de l'irrigation du 31 janvier 2024, le cumul d'eau commence à 17h00 avec un stock de 117.88mm jusqu'à atteindre un maximum de 302.98mm à 18 h30, alors que l'irrigation s'est arrêté à 19h00 (Figure 39). Certes, il y a une sur-irrigation de 30 minutes, mais ça reste une période minimale par rapport aux autres cas.

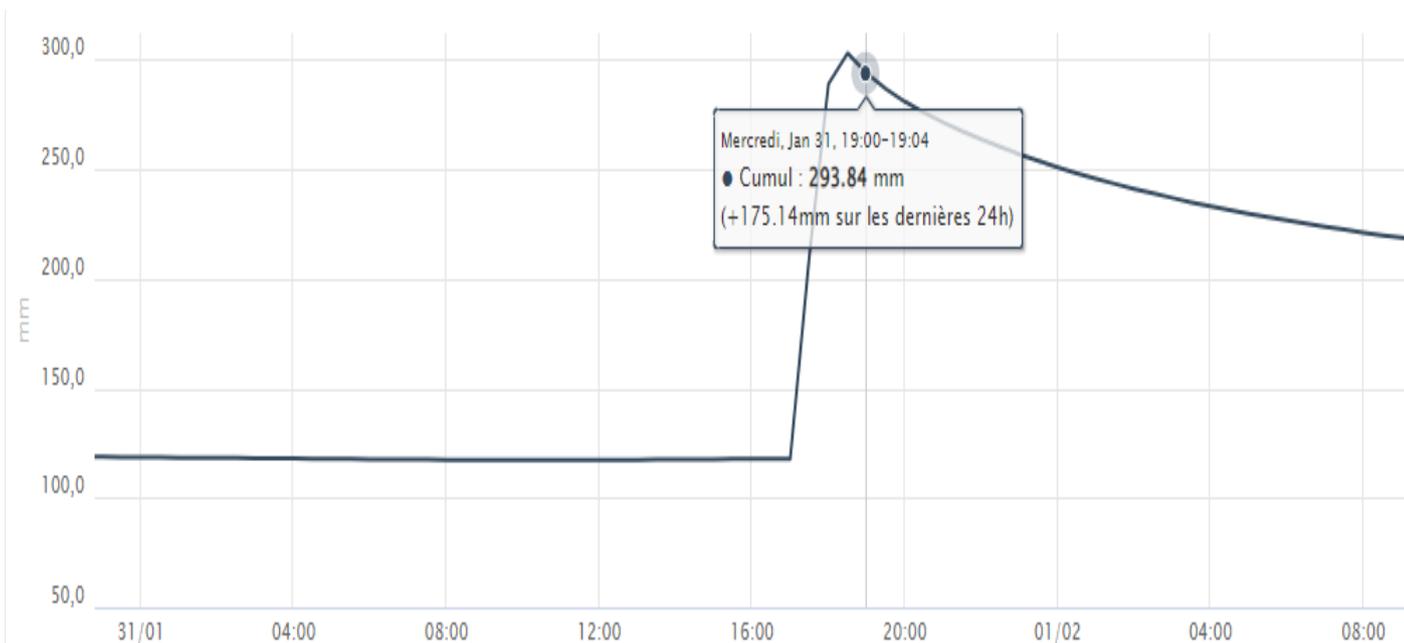


Figure 39: Cas de l’irrigation du 31/01/2024 au sein de la parcelle Kaabi 2.

Le tableau 10 résume la répartition des irrigations et la durée des tours d’eau selon le cycle phénologique décrit par les agriculteurs de Kebili. Le nombre des irrigations durant les phases de floraison, pollinisation et de maturation des fruits est satisfaisant avec un tour d’eau moyen 16 à 20 jours et un tour d’eau maximale de 32 à 33. Les deux irrigations réalisées pendant la période de récolte montre une gestion optimisée, puisque cette période ne nécessite pas une irrigation excessive.

Après l’irrigation du 13/04/2023, qui a abouti à un stock de 331.76mm, le stock d’eau facilement disponible aux cultures a été épuisé en 28 jours, soit le 10/05/2023. Les plantes ont alors subi un stress de 7 jours avant la prochaine irrigation. En revanche, après l’irrigation du 05/06/2023, qui a généré un $S_f = 271.64\text{mm}$, l’épuisement de la RFU se fait en 14 jours. Après l’irrigation du 12/07/2023 avec un cumul de 348.25 mm, l’épuisement de la RFU se fait en 21 jours, exposant ainsi les cultures à un stress hydrique de 11 jours

Tableau 10: Nombre des irrigations et les tours d'eau en fonction des stades phénologique du palmier dattier sur la parcelle Kaabi 2.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
	Repos végétatif		Floraison et pollinisation			Grossissement des fruits		Maturation			Récolte	
Nb d'irrigation 2023	N/A		6			3		7			2	
Tour d'eau 2023	moyenne	Max	Moyenne		Max	Moyenne	Max	Moyenne		Max	Moyenne	Max
	N/A	N/A	20		33	14	23	16		32	18	20
Nb d'irrigation 2024	3		3									
Tour d'eau 2024	moyenne	Max	Moyenne		Max							
	31	46	15		23							

3. Suivre de la conductivité électrique du sol

L'analyse de la conductivité électrique (CE) du sol dans les 4 parcelles révèle des relations intéressantes avec la température du sol et l'humidité du sol, ainsi que des variations importantes selon la profondeur du sol (Figure 40 et Figure 41).

D'après les figures 40 et 41, la CE et la température suivent la même allure. Ceci peut être dû un même facteur qui est le taux d'humidité du sol.

En effet, l'humidité du sol influence la CE de manière inversement proportionnelle. Cela veut dire que lorsque la quantité d'eau dans le sol augmente par une irrigation, cette eau dilue les sels dissous dans la solution du sol. Alors, elle agit comme un agent lessivant entraînant une diminution de la concentration en sels, par conséquent une baisse de la CE.

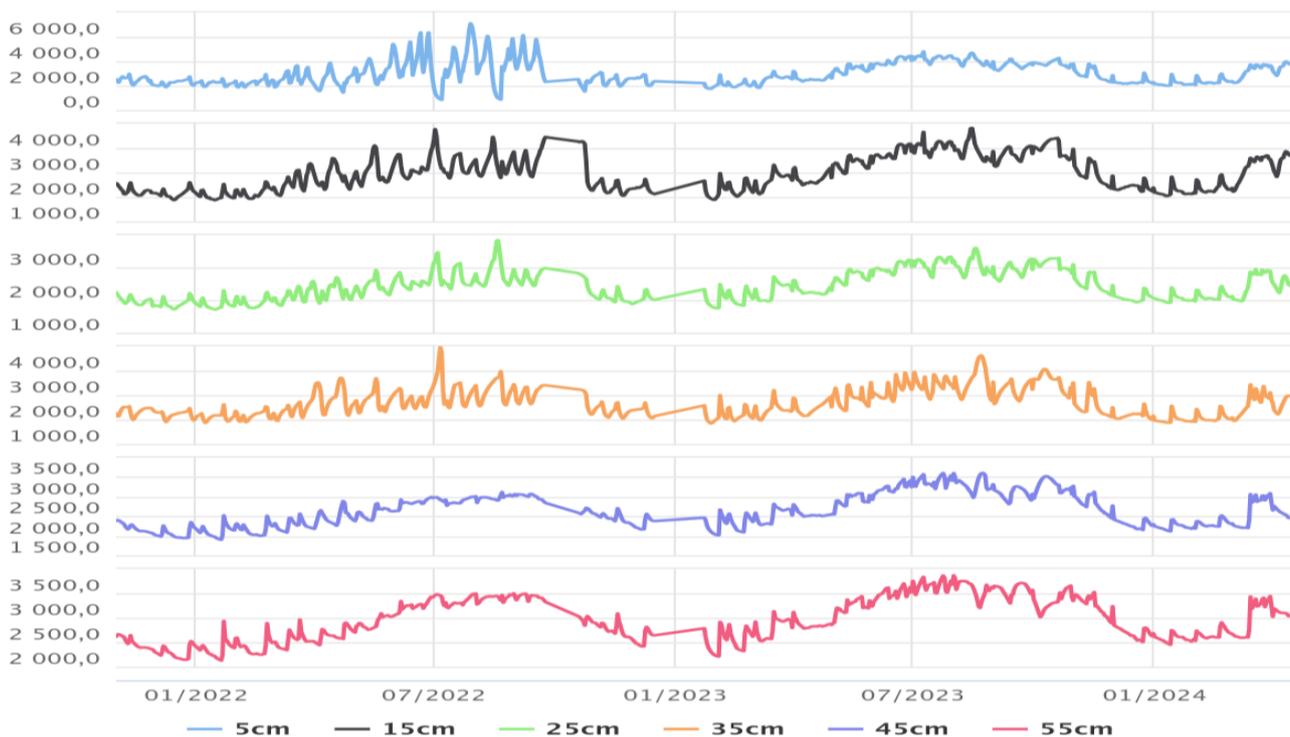


Figure 40: Evolution de la conductivité électrique sur les 6 niveaux du sol pendant la période d'étude du 01/11/2021 jusqu'au 06/04/2024 de la parcelle de Barghouthia Massire 1.

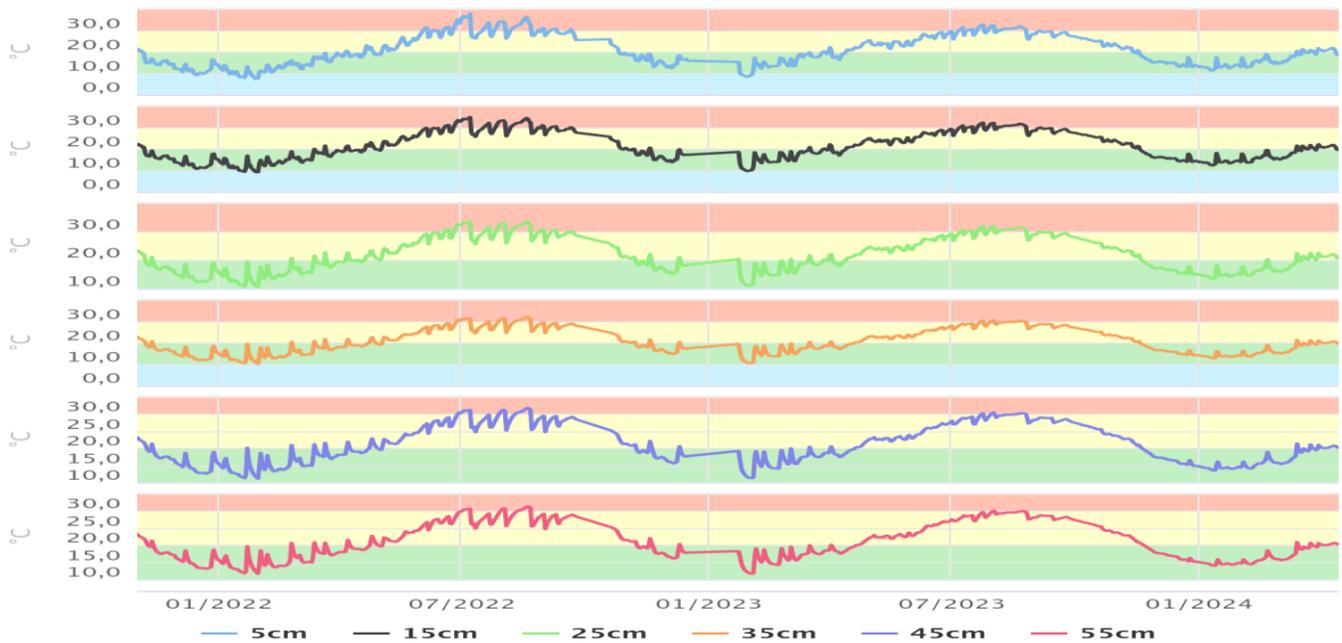


Figure 41: Evolution de la température du sol sur les 6 niveaux du sol pendant la période d'étude du 01/11/2021 jusqu'au 06/04/2024 de la parcelle de Barghouthia Massire 1.

Les mesures de la conductivité électrique dans les différents niveaux du sol dans les 4 parcelles sont représentées dans le tableau 11.

La conductivité électrique maximale est observée dans les premiers horizons. Ceci est expliqué par le déplacement des sels avec l'eau vers les points hauts où l'eau s'évapore rapidement. Par la suite, les sels sont lessivés en profondeur quand l'eau est drainée. Ce qui explique les valeurs de CE élevée dans les profondeurs (à 55cm). Ceci indique la présence d'une couche de sel formé par la forte infiltration des sels.

Les valeurs minimales et maximales montrent des écarts significatifs indiquant des fluctuations importantes de la conductivité électrique.

Les valeurs moyenne de CE de la parcelle Massire 1 sont généralement plus élevées que les valeurs moyenne de la CE de la parcelle Massire 2. Ceci est expliqué par la présence de différentes cultures de différents étages sur la parcelle Massire 2, ce qui limite l'évapotranspiration du coup limite la concentration des sels. Alors que la parcelle Massire 1 est exposée à une évapotranspiration plus importante.

Les mesures maximale de CE au sein des deux parcelles d'El Kaabi sont particulièrement élevées principalement à des faibles profondeurs.

Les valeurs de CE de la parcelle Kaabi 1 sont relativement faibles par rapport à celle enregistrées dans les autres oasis, à l'exception de la première profondeur (5cm). Ces valeurs s'expliquent par la teneur en eau toujours élevée de la parcelle, ce qui entraîne une dilution des sels sur les profondeurs de 15cm à 55cm et une concentration en surface, là où l'eau ne persiste pas et s'infiltré rapidement.

La parcelle Kaabi 2 est munie d'un couvert végétal qui limite l'évapotranspiration alors que les valeurs de la CE sont toujours élevées. Ces fortes concentrations en sel enregistrées, ne peuvent être expliquées que par une forte conductivité électrique des eaux d'irrigation.

Tableau 11: Les mesures de la conductivité électrique du sol dans les parcelles de l'oasis d'El Barghouthia (du 01-11-2021 jusqu'au 06-04-2024) et les parcelles de l'oasis d'El Kaabi (du 01-03-2024 jusqu'au 09-04-2024)

Oasis	Profondeur	5cm	15cm	25cm	35cm	45cm	55cm
Parcelle Massire 1 Barghouthia (1 étage)	CE Moyenne	3262	3078	2518	2822	2703	3014
	CE Maximum	7694	5113	3918	5126	3916	4064
	CE Minimum	921	1911	1733	1866	1908	2134
Parcelle Massire 2 Barghouthia (3 étages)	CE Moyenne	2555	2153	2401	1842	2182	2452
	CE Maximum	5696	3092	3357	2914	3083	3422
	CE Minimum	1158	1690	1771	1445	1709	1875
Parcelle Kaabi 1 (1 étage)	CE Moyenne	5855	1184	695	829	1127	832
	CE Maximum	14091	2611	3099	2846	3248	2048
	CE Minimum	10	0	0	0	0	0
Parcelle Kaabi 2 (1 étage)	CE Moyenne	13111	11065	8851	7729	6861	12952
	CE Maximum	23109	18741	17694	16708	14431	27828
	CE Minimum	7	5	5	2	7	5

Chapitre 2 : Caractérisation du microclimat oasien

Pour l'évaluation du microclimat deux stations météo sont installées dans les parcelles de Barghouthia.

Une première station est installée dans la parcelle d'un seul étage Massire 1 (Figure 42-A) à côté d'un palmier dattier, et une deuxième station est installée dans la parcelle de trois étages Massire 2 à côté d'un palmier dattier, un oranger et un olivier (Figure 42-B).



Figure 42 : A: Station météo Massire 1; B: Station météo Massire 2.

1. Température

1.1 La température moyenne

D'après l'analyse de l'évolution journalière des températures moyennes enregistrées au sein de la parcelle à un étage et la parcelle à trois étages durant la période d'étude qui s'étant du 02-04-2021 jusqu'au 14-03-2024, il existe une différence entre les deux types du microclimat (Figure 43).

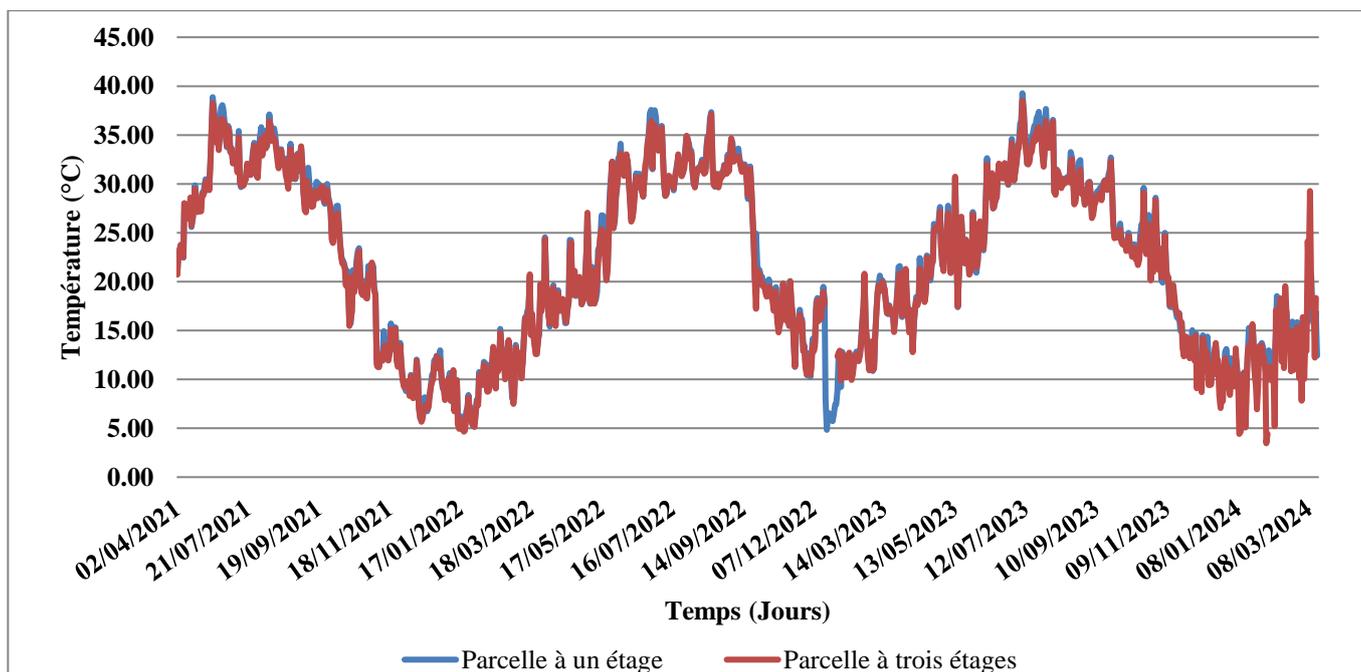


Figure 43: Evolutions des températures journalières moyennes au sein des deux parcelles

Les températures des deux parcelles semblent être similaires avec des variations mineures. Pour mieux comprendre cette variation, la période d'étude a été divisée en 4 années : 2021-2022-2023-2024 (figure 44).

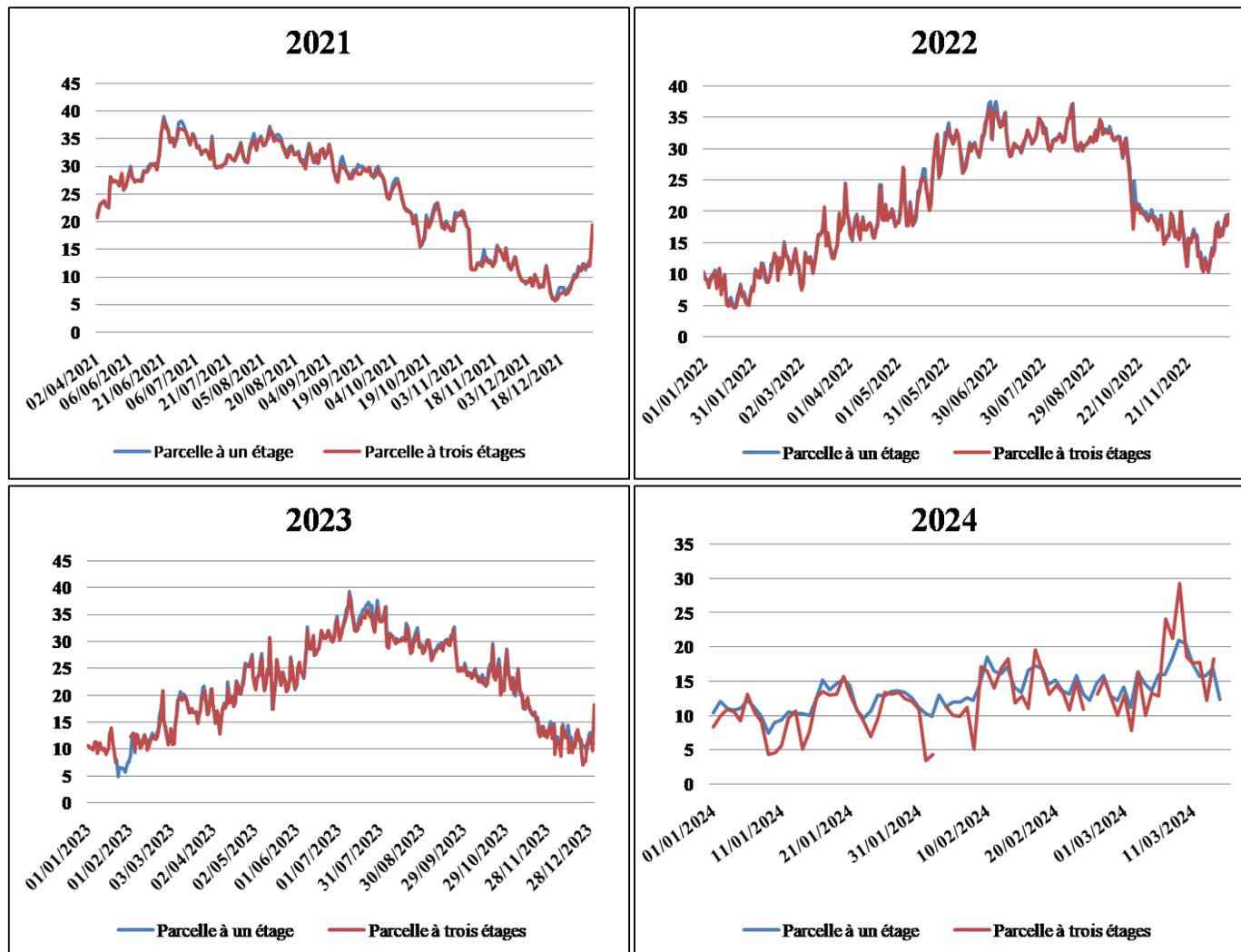


Figure 44: La variation des températures pendant les années 2021-2022-2023-2024

D'après les courbes de la figure 44, la parcelle à un étage présente des températures légèrement plus élevées que celle de la parcelle à trois étages. Ces différences sont particulièrement marquées pendant les périodes estivales (Juin à Août), où la parcelle à un étage atteint des températures maximales plus élevées que la parcelle à trois étages. Ainsi, la parcelle à trois étages montre une atténuation des températures extrêmes par rapport à la première parcelle. Pendant les périodes hivernales, les différences sont moins prononcées, mais la structure à trois étages semble toujours maintenir des températures légèrement plus modérées.

1.2. Accumulation des quantités de chaleur

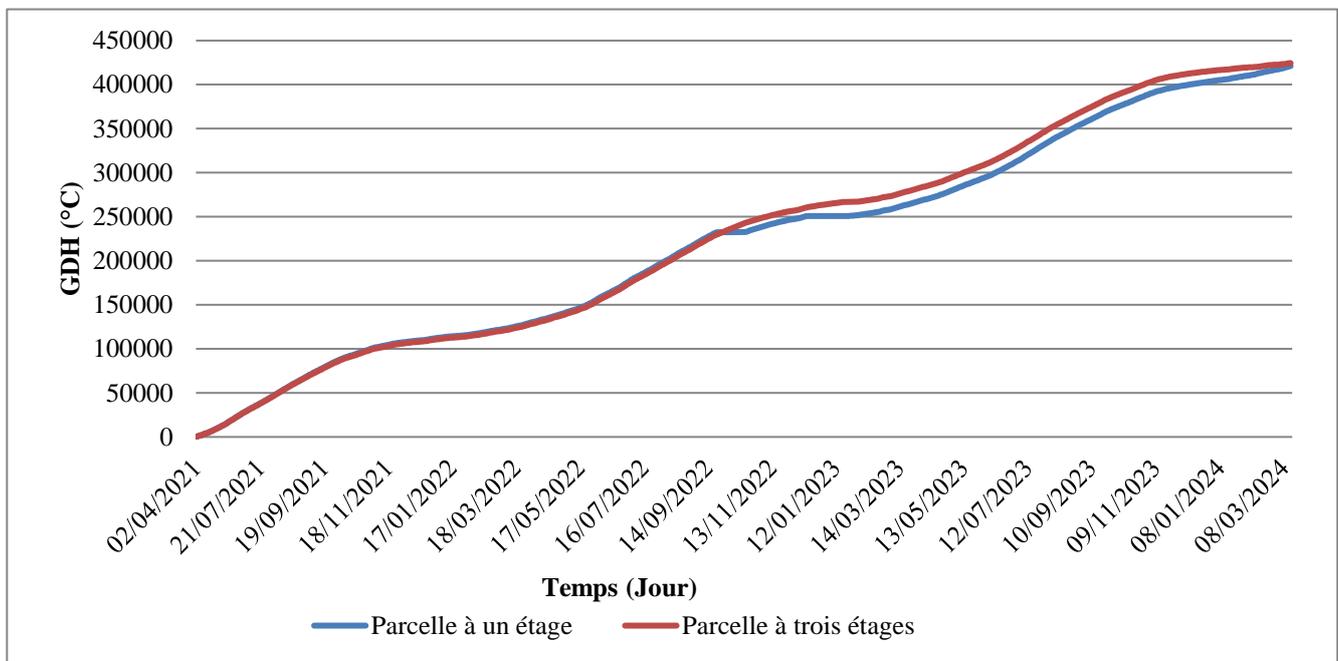


Figure 45: Evolution de la somme des températures chaudes (GDH) dans les deux parcelles

Une somme des températures chaudes égale à $GDH = 421041.89^\circ\text{C}$ a été enregistré au sein de la parcelle à un étage, alors que la somme de températures chaudes au sein de la parcelle à trois étages est égale à $GDH = 424381.5^\circ\text{C}$ pendant la période de l'étude allant du 02-04-2021 jusqu'au 14-03-2024. Alors, on trouve une différence de 3339.61°C de chaleur accumulée entre les deux types de structures (Figure 45).

Cette accumulation de chaleur plus élevée pour la parcelle à trois étages peut être expliquée par la structure en étages qui contribue à l'uniformité des températures. Alors que les températures de la parcelle à un seul étage plus basses la nuit pourraient limiter l'accumulation de chaleur au sein de celui-ci.

1.3. Estimation des portions de froid

La détermination des portions de froid (CP) accumulées au sein des deux parcelles par le modèle dynamique permet d'identifier les périodes exactes de l'accumulation du froid hivernal. De plus, elle nous permet de dégager la différence du microclimat.

En effet pour la période du 01/10/2021 au 31/03/2022 (Figure 46), l'accumulation des CP a commencé pour la parcelle à trois étages le 08/11/2021, alors que la parcelle à un étage a commencé l'accumulation des CP le 26/11/2021. L'accumulation des deux parcelles s'est arrêté le 10/03/2022. En effet, la parcelle à un seul étage a accumulé un nombre de CP= 51.63 alors que pour la parcelle à trois étages le nombre de portions de froid est CP=51.98.

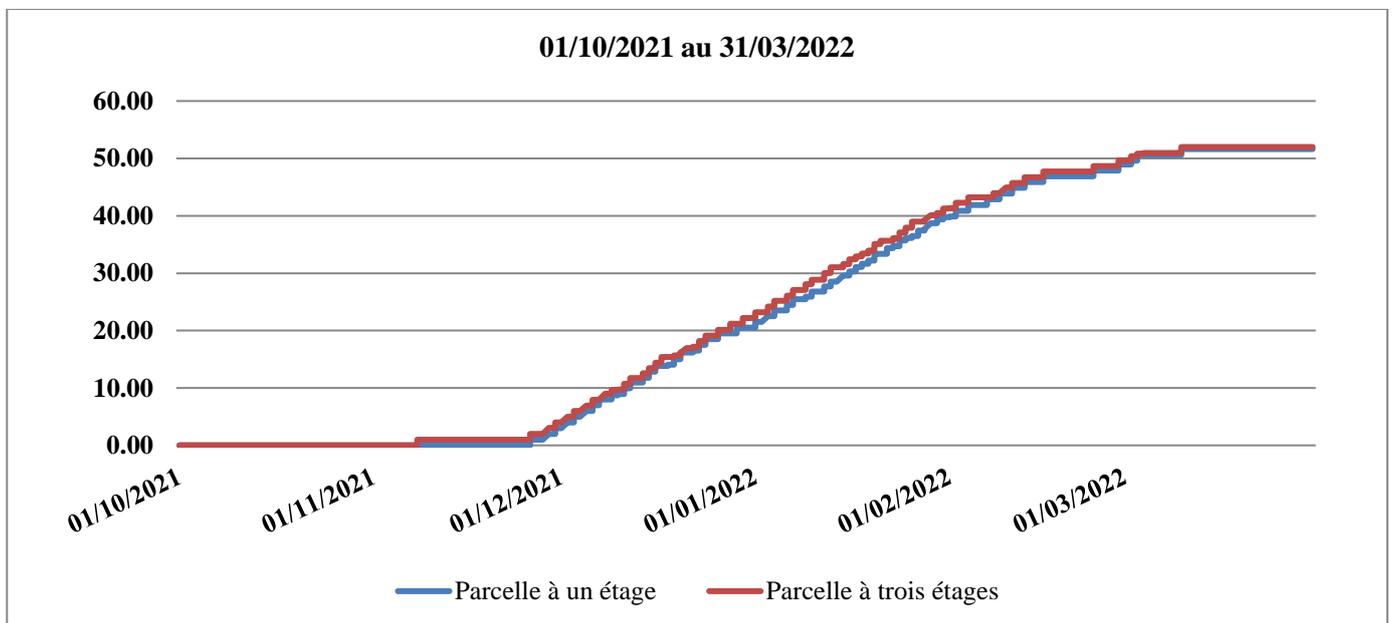


Figure 46: Evolution de l'accumulation des portions de froid au sein des deux parcelles pour la période du 01/10/2021 au 31/03/2022, selon le modèle dynamique .

Pour la période du 18/11/2022 au 31/03/2023, l'accumulation des portions de froid a commencé, pour les deux parcelles, le 21/11/2022 et elle est étendue jusqu'au 05/03/2023. La parcelle à trois étages a enregistré un nombre de portions de froid de CP= 30.17, tandis que la parcelle à un étage a accumulé CP= 22.71. Alors il existe une différence de 7.46 portions de froid.

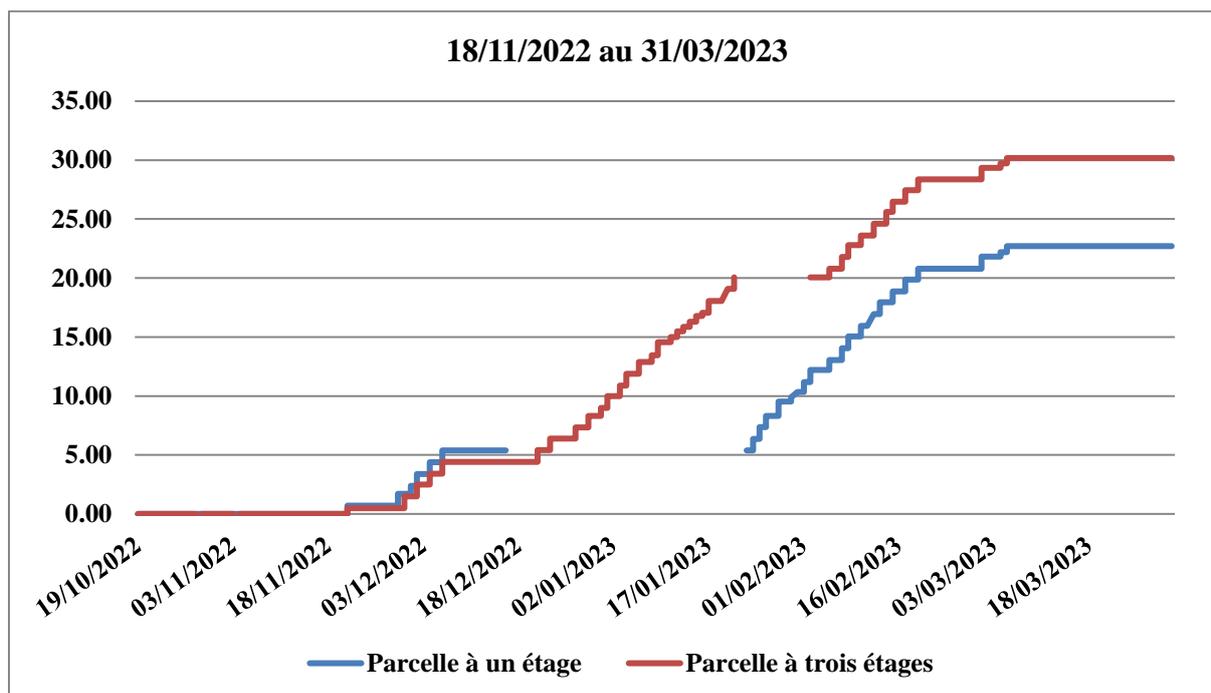


Figure 47 : Evolution de l'accumulation des portions de froid au sein des deux parcelles pour la période du 18/11/2022 au 31/03/2023, selon le modèle dynamique .

Ainsi, la parcelle à trois étages a commencé l'accumulation des portions de froid (CP) plus tôt que la parcelle à un étage pour la première période, et elle a accumulé 7.46 portions de froid de plus. Ceci peut être attribué à la structure de la parcelle, qui favorise une isolation et une rétention plus efficace du froid grâce à la densité de végétation. Cette structure permet de réduire l'exposition directe au rayonnement solaire et augmenter l'ombre, contribuant ainsi à des températures plus basses et une accumulation plus précoce des CP.

2. L'humidité relative

Le suivi de la variation de l'humidité relative (HR) moyenne au sein des deux parcelles révèle une différence entre les deux types de structure. En effet, la tendance générale de l'HR suit la même allure pour les deux parcelles, avec des valeurs qui approchant les 90% pendant les mois les plus froids, et 65% pendant les mois les plus chauds (Figure 48).

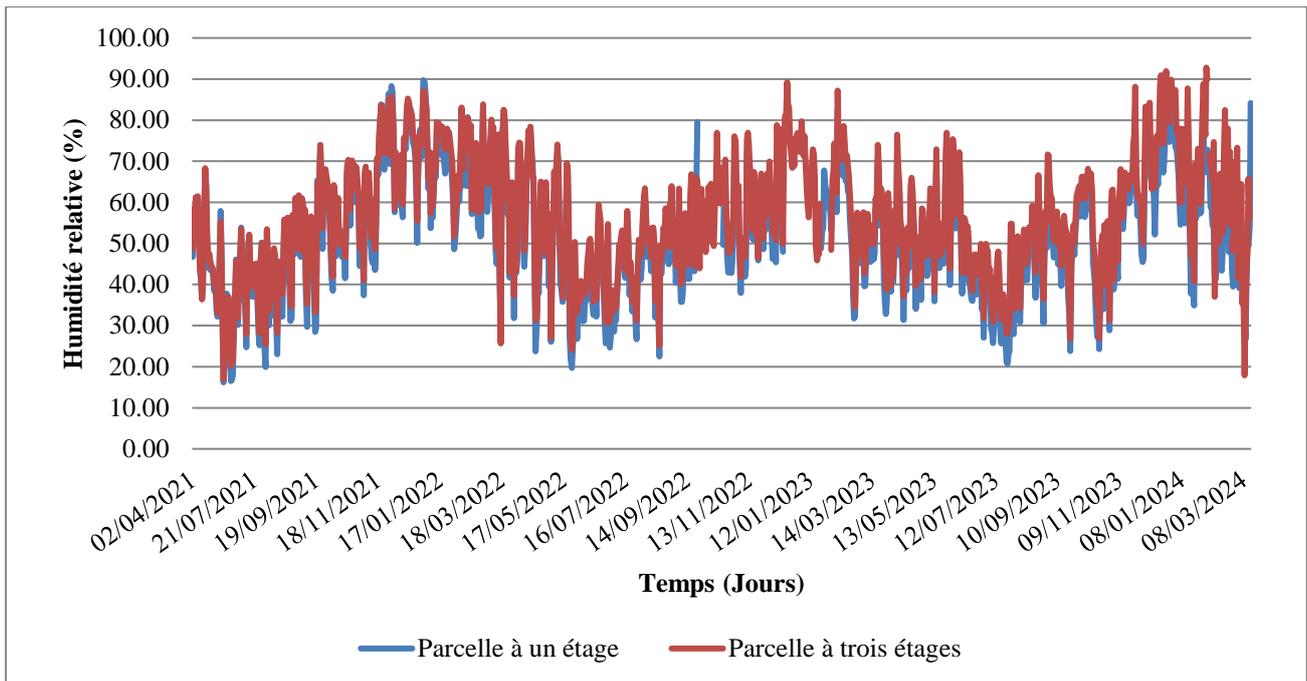


Figure 48: Variation de l'humidité relative journalière moyenne au sein des deux oasis

En examinant la courbe de différences d'HR entre les deux parcelles (Figure 49), on constate que la parcelle à trois étages affiche des valeurs plus élevée que la parcelle à un seul étage. Cette différence a atteint un maximum de $\Delta HR = 17.22\%$ enregistré le 02/02/2024 et un minimum $\Delta HR = 0.01\%$ pour le 21/05/2021.

Ce maintien d'un niveau d'humidité plus élevé au sein de la parcelle à trois étages peut être expliqué par une réduction de l'évapotranspiration à l'intérieur de la parcelle ainsi que l'effet de la couverture végétale supplémentaire du sol, ce qui favorise la rétention de l'humidité. Avec une évapotranspiration réduite, la teneur en eau du sol est mieux conservée et reste plus longtemps accessible pour les cultures. Ce qui limite le stress hydrique et améliore la vigueur, la productivité et la résistance aux maladies des cultures présentes.

Il est important à noter qu'il existe certainement des journées où l'HR de la parcelle à un étage dépasse celle de la parcelle à trois étages.

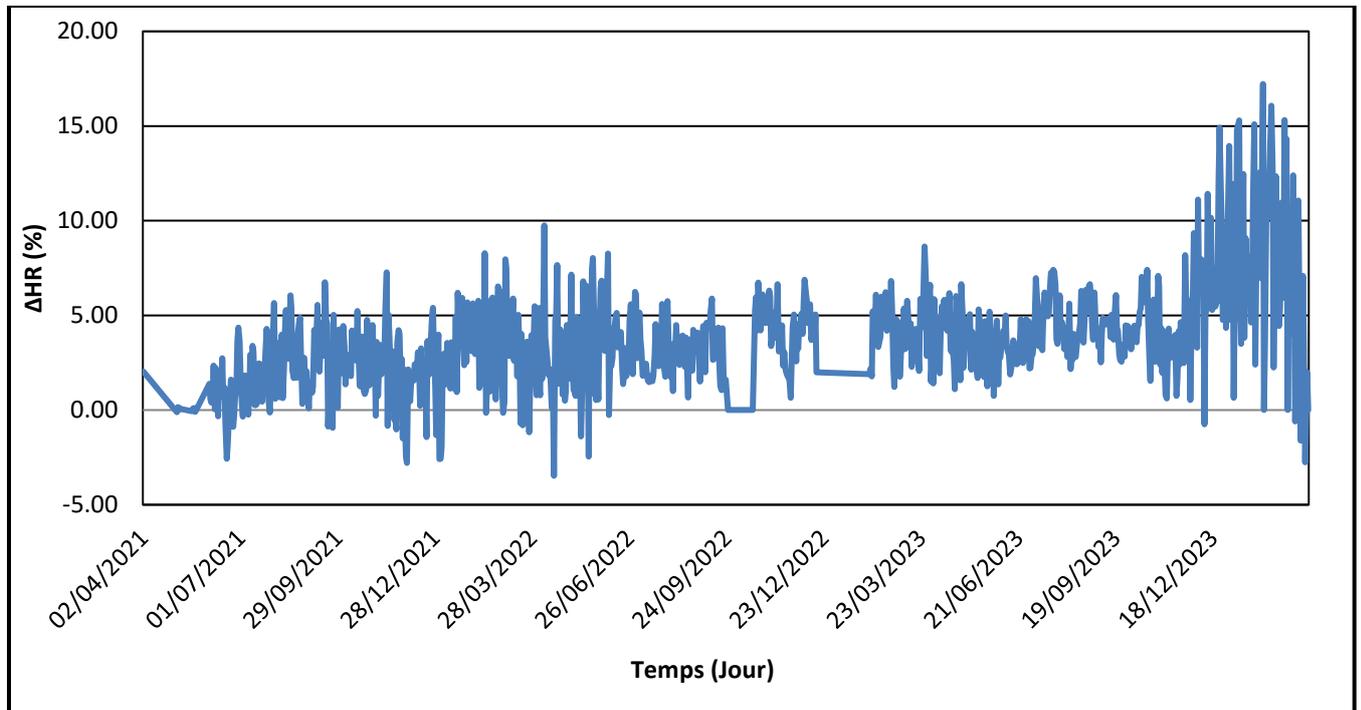


Figure 49: Courbe de la différence de l'humidité relative entre la parcelle à trois étages et la parcelle à un étage.

3. Cas des journées à températures extrêmes.

Pour mieux comprendre la dynamique du microclimat au sein des deux parcelles, nous avons analysé les courbes de l'évolution de la température et de l'humidité relative au cours du temps pour la journée la plus chaude et la journée la plus froide de la période d'étude.

La journée du 29/07/2023 était la journée la plus chaude de la période d'étude (Figure 50). Les températures enregistrées dans la parcelle à un seul étage étaient plus élevées que celles de la parcelle à trois étages, particulièrement pendant les premières heures de la journée (de minuit à 9h), avec un écart moyen de 1,7 °C, ainsi que pendant les dernières heures de la journée (à partir de 16 h), avec un écart moyen de 2.1 °C. En revanche, de 9 h à 16 h, les températures étaient plus élevées dans la parcelle à trois étages, avec un écart moyen de 0,63 °C.

En ce qui concerne l'humidité relative, elle était plus élevée dans la parcelle à trois étages pendant toute la journée, particulièrement de minuit à 10h. L'humidité atteignait un maximum de 61,99 % à 8h, avec un écart moyen de 8.73%. Elle diminuait ensuite pour atteindre un minimum de 11,03% à 16 h, restant tout de même supérieure à celle de la parcelle à un étage avec un écart moyen de 1.32%. Enfin, l'humidité augmentait à nouveau, avec un écart moyen de 6.49%.

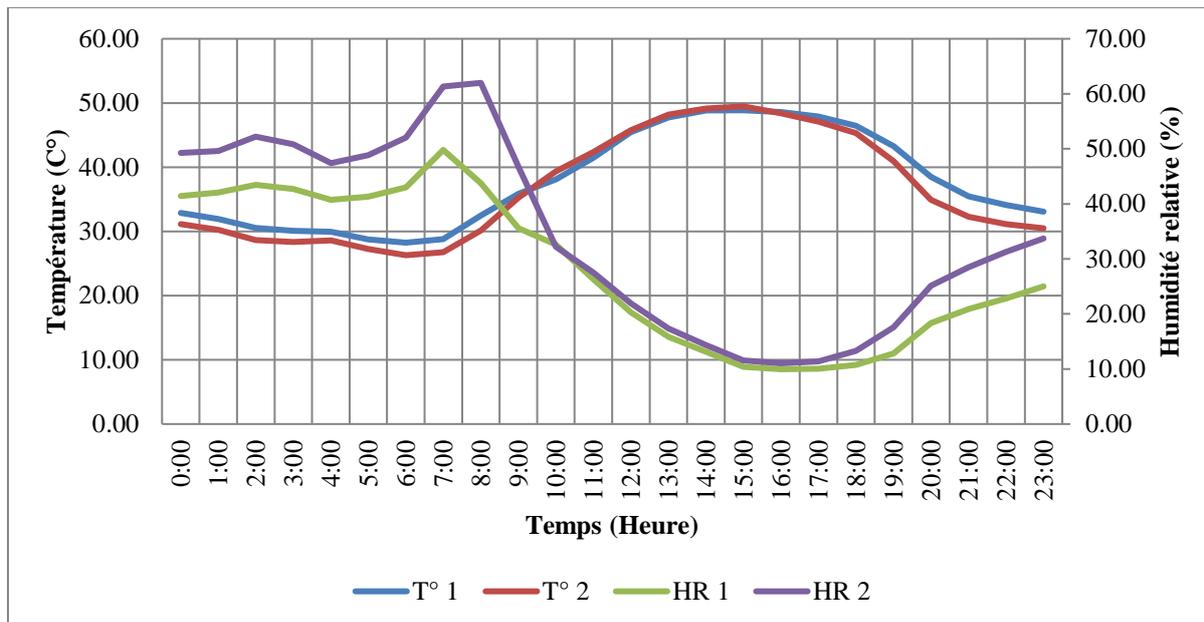


Figure 50: Variation de la température et de l'humidité relative durant la journée la plus chaude (29-07-2023) ; T°1: Température de la parcelle à un étage; T° 2: Température de la parcelle à trois étages; HR 1: Humidité relative de la parcelle à un étage; HR 2: Humidité relative de la parcelle à trois étages.

Pour la journée la plus froide, on étudie le cas du 21-01-2022 (Figure 51). Les températures varient entre $-0,96^{\circ}\text{C}$ et $15,63^{\circ}\text{C}$. Les températures de la parcelle à un étage étaient légèrement plus élevées de minuit à 8h, avec une différence moyenne de $0,46^{\circ}\text{C}$ par rapport à la parcelle à trois étages. Les températures de la parcelle à trois étages augmentaient ensuite jusqu'à 16 h, atteignant un maximum de $15,63^{\circ}\text{C}$ pour la parcelle à trois étages et $15,37^{\circ}\text{C}$ pour la parcelle à un seul étage, avec un écart moyen de $2,23^{\circ}\text{C}$ en faveur de la parcelle à trois étages. Les températures commençaient à diminuer à partir de 16h, avec un écart moyen de $1,47^{\circ}\text{C}$ en faveur de la parcelle à un seul étage.

L'humidité relative suivait une dynamique similaire à celle de la température. Elle commençait à minuit avec un taux proche de la saturation, environ 84.33% pour la parcelle à trois étages et 78.18% pour la parcelle à un seul étage, avec un écart moyen de 5.36% jusqu'à 8 h. De 8 h à 15h, l'humidité relative diminuait dans les deux oasis, atteignant 41.17% dans la parcelle à un seul étage et 42.01 % dans la parcelle à trois étages, avec un écart moyen de 4.61%. Ensuite, l'humidité augmentait à nouveau, avec un écart moyen de 6,87% en faveur de la parcelle à trois étages.

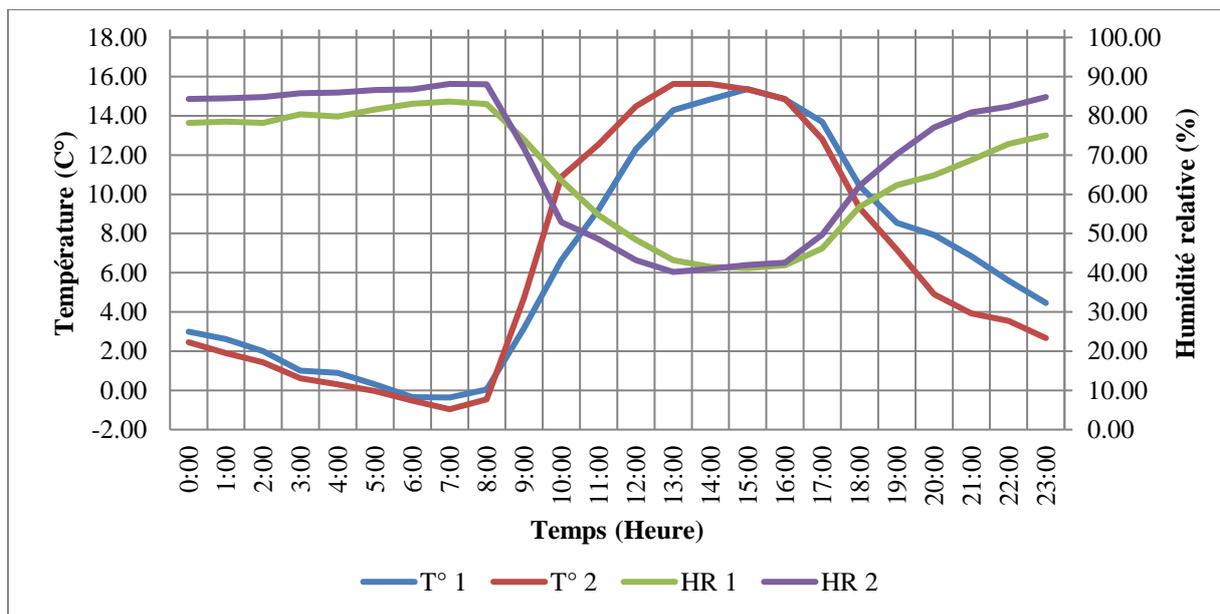


Figure 51: Variation de la température et de l'humidité relative durant la journée la plus froide (21-01-2022) ; T° 1: Température de la parcelle à un étage; T° 2: Température de la parcelle à trois étages; HR 1: Humidité relative de la parcelle à un étage; HR 2.

La relation entre la température et l'humidité relative est inversement proportionnelle : lorsque la température augmente, l'humidité relative diminue, et vice versa. Cette relation est expliquée par la présence des trois étages. Au fait, plus la végétation de la parcelle est dense, plus l'HR est maintenu au sein de l'oasis, et plus les températures extrêmes sont atténuées.

4. Vitesse du vent

4.1. Vitesse du vent moyen

En comparant les vitesses du vent moyen au sein des deux parcelles pendant toute la période de l'étude, on observe une différence remarquable entre les deux parcelles. En effet, l'intensité du vent au sein de la parcelle à un étage est beaucoup plus forte par rapport à celle de la parcelle à trois étages (figure 52). Cette différence est directement liée à la densité de plantation et à la structure de la parcelle.

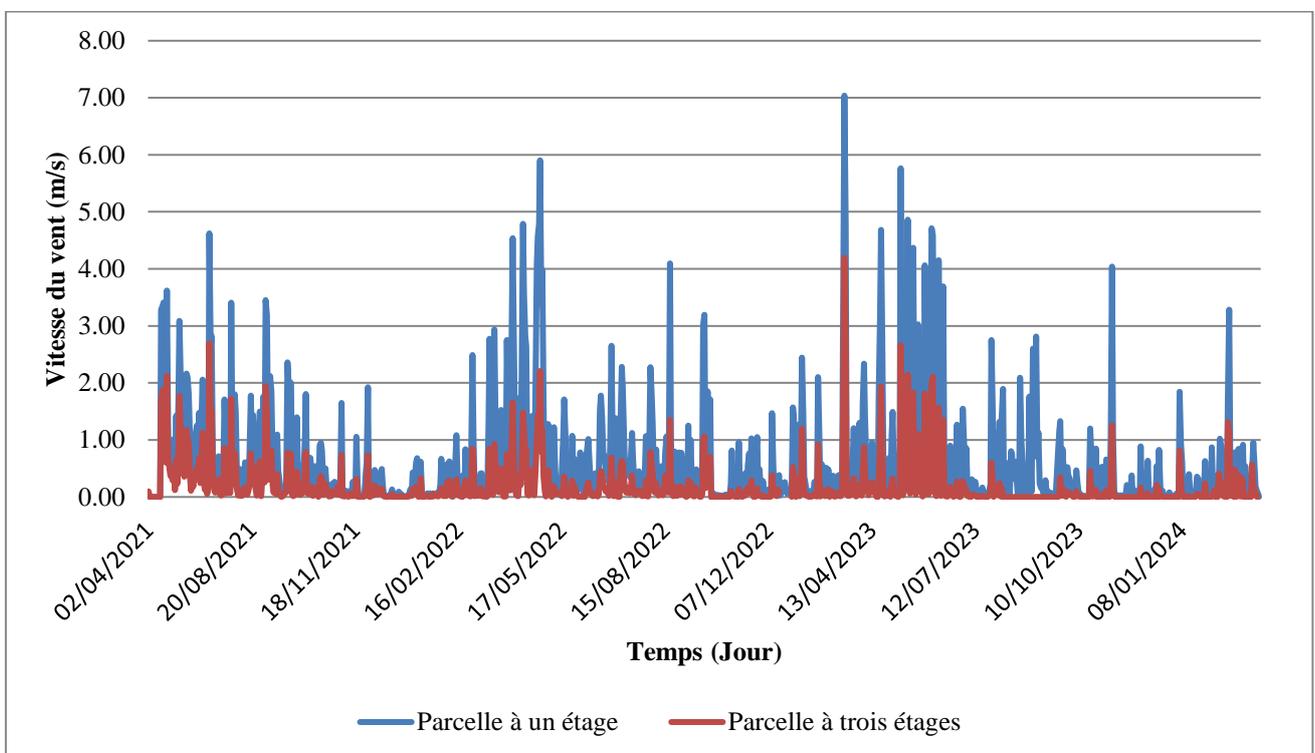


Figure 52: Variation de la vitesse moyenne du vent moyen au sein des deux parcelles

Pour une meilleure compréhension de cette différence, on s'intéresse à étudier des intervalles de temps plus courts pour voir l'évolution de la vitesse du vent moyen au sein des deux parcelles. Pour le 08-05-2023, la vitesse du vent moyen a été maximale (Figure 53). La courbe montre un pic de la vitesse moyenne au sein de la parcelle d'un étage, ce qui crée une différence de 6.5 m/s entre la parcelle à un étage et la parcelle à trois étages.

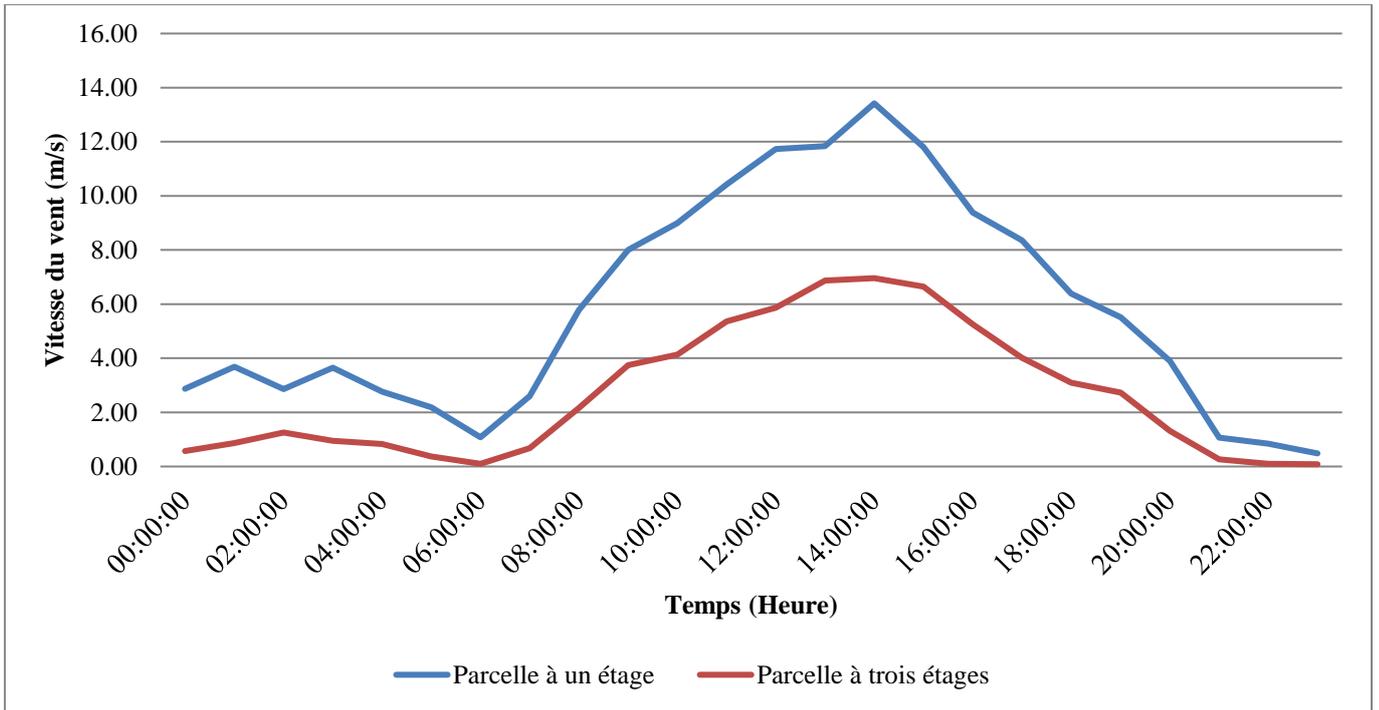


Figure 53: Variation du vent moyen au sein des deux oasis pour le 08-05-2023

4.2. Vitesse du vent rafale

La variation de la vitesse du vent rafale dans les deux parcelles montre l'effet de la structure en trois étage. En effet, les vitesses enregistrées dans la parcelle à un étage sont beaucoup plus élevées que celle enregistrées dans la parcelle à trois étages (Figure 54).

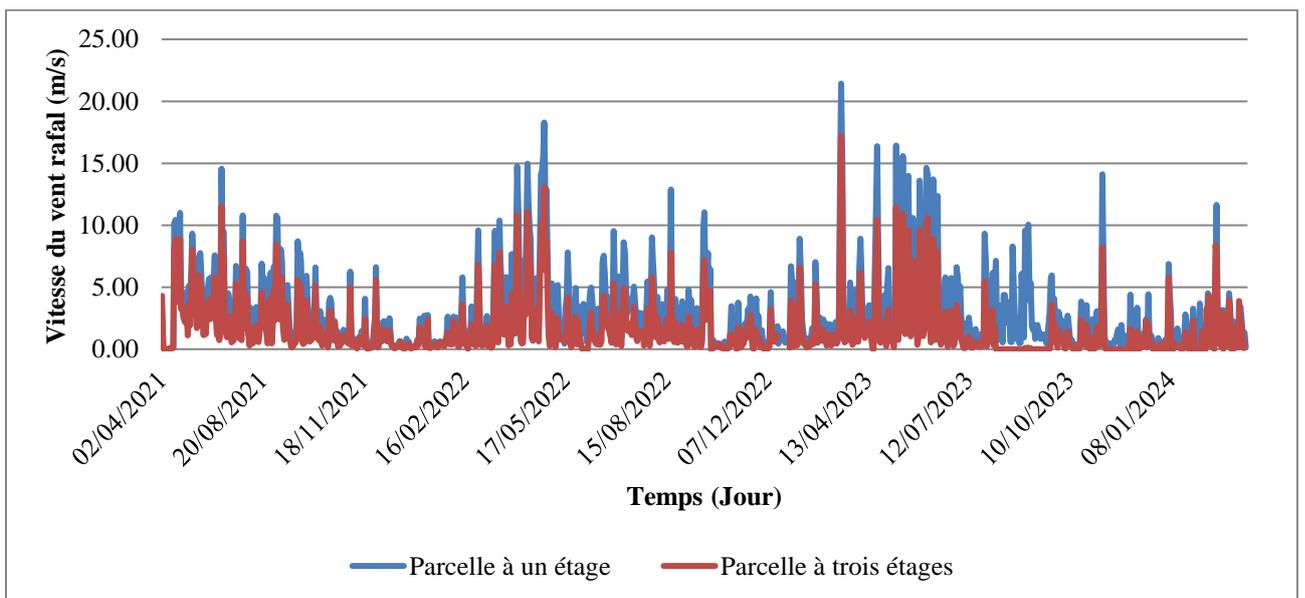


Figure 54: Variation de la vitesse moyenne du vent rafale dans les deux parcelles

Pour bien observé cette différence, on a pris le cas du 08-05-2023 durant lequel on a enregistré le maximum de la vitesse (Figure 55). On note que la vitesse dans la parcelle à un étage a atteint un maximum de 33.34 m/s créant ainsi une amplitude de 11 m/s entre les deux parcelles. Ce vent rafale peut causer des dégâts à la parcelle d'un étage influençant la croissance des plantes et le rendement des palmiers dattier.

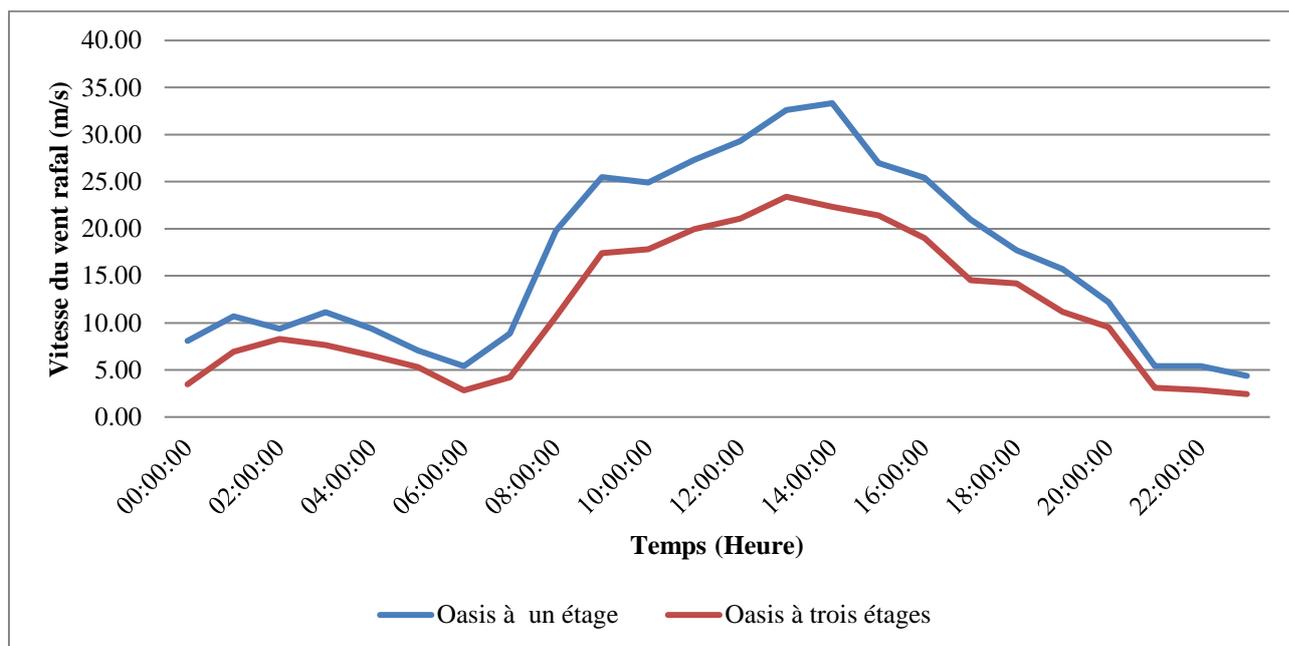


Figure 55: Variation du vent rafale au sein des deux parcelle pour le 08-05-2023

Discussion

Les stratégies de gestions de l'irrigation diffèrent d'un agriculteur à un autre, même s'ils appartiennent à un même GDA. Ces stratégies ont un impact important sur divers aspects de l'écosystème oasien. Les agriculteurs des parcelles Massire 1, Massire 2 et Kaabi 1 disposent d'une autonomie en matière de gestion de l'irrigation grâce à leurs forages privés en plus de l'eau fournie par le GDA.

Pour la parcelle Massire 1, cette autonomie est principalement utilisée pour la production de palmiers dattiers de la variété « Deglet Nour ». La gestion actuelle des ressources en eau manque de précision, avec des périodes d'irrigations inégaux et une saturation fréquente des sols. Les taux de CE suggèrent une évapotranspiration élevée et une concentration accrue des sels, ce qui peut aboutir à une détérioration de la qualité du sol. Pour améliorer la gestion de l'irrigation, il est conseillé de stabiliser la fréquence des irrigations et suivre les besoins du palmier dattier. Il est préférable d'adopter des techniques d'irrigation plus précises pour éviter les périodes de sur-irrigation et le gaspillage d'eau et d'énergie. De plus, l'introduction de cultures de différents étages pourrait aider à réduire l'évapotranspiration et à améliorer la rétention d'eau.

Pour la parcelle Massire 2, la présence des trois étages constitue un avantage pour le développement et la croissance des cultures présentes. Il est certain que l'irrigation n'est pas bien gérée, et ce à cause de la grande superficie de la parcelle par au système d'irrigation installé qui exige beaucoup de main d'œuvre. Il est conseillé de profiter des conditions climatiques que l'effet oasis dans cette parcelle offre, en stabilisant les tours d'eau et les quantités apportées surtout pendant les phases critiques du cycle phénologique avec des quantités modérées afin de réduire le risque de stress hydrique ou le risque d'asphyxie.

Pour la parcelle de Kaabi 1, il y a une prise de conscience en termes de gestion de l'irrigation. En effet, en comparant les données de l'année 2023 et celles de l'année 2024, on remarque que les irrigations sont plus régulières et avec des quantités et durée modérée. La teneur en eau élevée contribue à une dilution des sels dans les couches plus profondes (15 à 55 cm) tandis que la surface reste plus salée en raison de l'infiltration rapide de l'eau. On peut dire que la sondes capacitive installée, a permis de confirmer que l'installation de cette

technologie peut améliorer la gestion des ressources en eau et d'aider à adapter un tour d'eau adéquat dans la parcelle.

La gestion de la parcelle Kaabi 2 montre une amélioration progressive, bien que la fréquence ne soit pas encore stable à cause de la dépendance de la parcelle au GDA. Cependant, il est crucial que cet agriculteur arrête l'utilisation de son puits de surface à cause de la salinité excessive présente dans ces eaux qui a causé des taux de CE très élevés.

Afin de contrôler ces problèmes, il est important de suivre un calendrier d'irrigation spécifique à chaque parcelle, en tenant compte de leur situation et du cycle phénologique des cultures. D'après les données enregistrées, en période estivale et en période de floraison et pollinisation, les tours d'eau ne doivent pas dépasser les 14 jours. Alors qu'en périodes hivernales qui coïncident avec une période de récolte et une période de repos végétative, il est suggéré de faire des irrigations de soutien avec des tours d'eau qui ne dépassent pas les 20 jours sauf pour le cas de la présence d'autres cultures que le palmier dattier, où il faut adapter le calendrier d'irrigation avec les besoins des cultures présentes.

La parcelle à trois étages semble offrir une meilleure régulation de la température et de l'humidité relative, ce qui pourrait être bénéfique pour certaines cultures sensibles aux variations extrêmes du climat.

Le microclimat de la parcelle à un étage a accumulé une somme de $GDH=421041.89C^{\circ}$, alors que la parcelle à trois étages a accumulé une somme de $424381.5C^{\circ}$. Ceci met en avant la structure de trois étages où la biodiversité est plus répandue.

De plus, le modèle dynamique a montré que pour les deux périodes d'accumulation de portion de froid, la parcelle à trois étages accumule toujours un nombre de plus et elle prolonge la période de l'accumulation.

Le microclimat oasien joue un rôle important dans l'atténuation des températures extrêmes et la création de conditions favorables au développement des cultures. Les palmiers dattiers, en formant le premier étage de la stratification des cultures, fournissent une ombre bénéfique qui réduit les températures au sol et diminue l'évapotranspiration. Cela permet de maintenir une humidité relative plus élevée, créant ainsi un environnement plus propice à la

croissance et à la photosynthèse des plantes sous-jacentes. Avec une évapotranspiration réduite, la teneur en eau du sol est mieux conservée et reste plus longtemps accessible pour les cultures. Ce qui limite le stress hydrique et améliore la vigueur, la productivité et la résistance aux maladies des cultures présentes.

Cette ombre et cette humidité modérée aident à atténuer les effets desséchants du vent, réduisant ainsi le stress hydrique sur les cultures. De plus, le microclimat oasien permet une maturation plus uniforme des fruits en limitant les fluctuations thermiques extrêmes, ce qui se traduit par une meilleure qualité des récoltes.

De plus, d'après les entretiens menés avec d'autres agriculteurs de la zone de Kebili, la biodiversité contribue à l'amélioration de la qualité du sol. Les différentes espèces végétales, avec leurs systèmes racinaires variés, améliorent la structure du sol et augmentent sa capacité de rétention d'eau. Les racines profondes des palmiers dattiers, par exemple, aident à maintenir l'humidité du sol en profondeur, tandis que les racines superficielles des cultures maraîchères et des arbres fruitiers améliorent l'infiltration et l'aération du sol. Cette diversité racinaire lutte efficacement contre l'érosion et la désertification en stabilisant le sol et en prévenant la perte de nutriments par le ruissellement. De plus, les débris végétaux et les résidus de cultures enrichissent le sol en matière organique, améliorant ainsi sa fertilité et son efficacité hydrique.

La biodiversité au sein des oasis offre également une diversification des sources de revenu pour les agriculteurs. La présence de différentes cultures permet de diminuer les risques économiques, car la défaillance d'une culture peut être compensée par le succès d'une autre. Cette diversification est importante pour la résilience économique des agriculteurs face au changement climatique et aux fluctuations des marchés.

Lorsque les revenus des agriculteurs augmentent, certes la plantation de nouvelles cultures et leurs diversifications va aboutir à une nouvelle biodiversité et à la restauration des oasis en plusieurs étages mais avec une modernisation des techniques d'entretien.

Il est clair que la disponibilité de l'eau n'est pas le seul obstacle à la culture des deuxième et troisième couches. Il existe également d'autres facteurs qui pourraient influencer la présence de ces strates. Il s'agit notamment de contraintes naturelles telles que la fertilité du

sol , la typologie de la parcelle et les maladies, des contraintes sociales, comme le manque de main d'œuvre et le morcellement, contraintes économiques telles que les coûts d'entretien, les coûts des de l'irrigation et les faibles prix de ventes, ou même des contraintes techniques des pratiques agricoles.

Conclusion et perspectives

L'étude de la gestion de l'irrigation dans les oasis de Kebili a mis en valeur l'importance cruciale de la ressource hydrique pour la biodiversité et la durabilité des écosystèmes oasiens. Les résultats ont révélé que la surexploitation des nappes phréatiques, due à l'augmentation du nombre des forages privés, a conduit à une diminution du débit des eaux d'irrigation et une réduction de la fréquence des tours d'eau. En parallèle, les stratégies d'irrigation des agriculteurs montrent une déconnexion totale entre la gestion actuelle de l'eau et les besoins réels des cultures, où on note souvent une sur-irrigation compensant les périodes de sécheresse, ce qui entraîne des problèmes de saturation et de salinisation des sols.

Pour faire face à ces défis, il est essentiel de développer des pratiques d'irrigation plus adaptées et durables. Cela implique la mise en place d'un calendrier d'irrigation adaptée aux cycles de croissance et de développement des cultures avec des tours d'eau réguliers. De plus, l'utilisation de technologies innovantes tel que les sondes capacitatives s'avère une technique efficace pour le suivi en temps réel de l'état des parcelles et les besoins en eau. D'autre part, l'introduction de différentes cultures pour créer les différents étages de l'oasis peut contribuer à un meilleur microclimat et à une gestion plus efficiente de l'eau, améliorant ainsi la résilience et la productivité des oasis.

La biodiversité du système oasien de Kebili est influencée par plusieurs facteurs. Elle à son tour a un impact significatif sur divers aspects de l'écosystème. Cependant, pour le rétablissement des systèmes oasiens, il est primordiale d'agir sur tous les facteurs et les contraintes de ce système, d'utiliser également des outils d'aide à la décision afin d'aboutir à la condition optimale.

Références Bibliographiques

- Akyurt M., Rehbini E., Bogis H., Aljinaidi A. A. 1839.** A survey of mechanization efforts on date palm crown operations. *World*, 2208, 2645.
- Aljane, F., Elbekkay, M., Neily, M. H., Hamza, H., Benoun, A., & Yahia, Y. 2020.** Study of the agrodiversity of fruit species in Tunisian oases: case of the Kébili region.
- Ben Aïssa I., Bouksila F., Bahri A., Bouarfa S., Chaumont C. et Hichri W., 2004.** Gestion de l'eau et des sels au sein d'une oasis du Sud tunisien. In : *Modernisation de l'Agriculture Irriguée*, du 19 au 23 avril 2004, Rabat, Maroc.
- Benmoussa H., El Kadri N., Ben Aïssa N., & Ben Mimoun M., 2022.** Impact of water availability on agro-biodiversity of oases in the Kebili region of southern Tunisia. In *XXXI International Horticultural Congress (IHC2022): International Symposium on Water: a Worldwide Challenge for Horticulture! 1373* (pp. 179-186).
- Brouwer C., Prins K., Kay M., Heibloem M., 1990.** Méthodes d'irrigation. FAO, Italy. Cemagref, 2003. irrigation Guide pratique (3ième édition). Cemagref édition.
- Daher A. 2010.** Détermination du sexe du palmier dattier : Approches hysto-cytologique et moléculaires. Thèse de doctorat Université de Montpellier, 160 p.
- Dhaouadi L., Ben Maachia S., Mkademi C., Oussama M., Daghari H. 2015.** Etude comparative des techniques d'irrigations sous palmier dattier dans les oasis de Deguache du Sud Tunisien. *J New Sci Agric Biotechnol*, 18(3), 658-667.
- Dransfield J., Uhl N.W., 1986.** An outline of a classification of palms. *Principles* 30 (1): 3-11.
- Faghim J., Mohamed M. B., Ali S. B., Triki T., Gasmi A., Zammouri T., Guasmi F. 2022.** Caractérisation physicochimiques du sol dans les deux cas de conduite: pluvial et irrigué. *JOURNAL OF OASIS AGRICULTURE AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT*, 4(2), 218-223.
- Fares M., Fargier Y., Villain G., Dérobert X., Coffec O., Lopes S. P. 2014.** Détermination du profil de teneur en eau dans le béton d'enrobage par inversion de mesures de

- permittivité au moyen de sondes capacitives/determination of water content profiles in concrete using the inversion of permittivity measurements by capacitive probe. In *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics* (Vol. 66, No. 1-3, p. 17). Editions ESKA.
- Ferry M., Toutain G., 1990.** Concurrence et complémentarité des espèces végétales dans les oasis méditerranéennes. *Sér. A n° 11*, - Les systèmes agricoles oasiens.
- Gaudin, R., & Brouwers, M., 2003.** L'eau utile et les caractéristiques hydrodynamiques des sols sous culture de canne à sucre.
- Gaudu J. C., Mathieu J. M., Fumanal J. C., Bruckler L., Chanzy A., Bertuzzi P., Guennelon R. 1993.** Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive: analyse des facteurs influençant la mesure. *Agronomie*, 13(1), 57-73.
- Ghazouani W., Marlet S., Mekki I., Vidal A. 2007.** Diagnostic et analyse du fonctionnement d'un périmètre oasien. Cas de l'oasis de Fatnassa Nord, Kébili, sud tunisien. In *Troisième atelier régional du projet Sirma* (pp. 18-p). Cirad.
- Jaradat A. A. 2011.** Biodiversity of date palm. *Encyclopedia of life support systems: Land use, land cover and soil sciences*. Oxford, UK: Eolss Publishers, 31.
- Jouve P. 2012.** Les oasis du Maghreb, des agro-écosystèmes de plus en plus menacés. Comment renforcer leur durabilité?. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 62(62), 113-122.
- Kadri, A., & Van Ranst, E. 2002.** Contraintes de la production oasienne et stratégies pour un développement durable. Cas des oasis de Nefzaoua (Sud tunisien). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 13(1), 5-12.
- Kai K., Matsuda M., Sato R. 1997.** Oasis effect observed at Zhangye oasis in the Hexi corridor, China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 75(6), 1171-1178.
- Kamel S., Dassi L., Zouari K., 2006.** Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie, *Hydrological Sciences Journal*, 51:4, 713-730.

- Kassah, A. 2009.** Oasis et aménagement en zones arides. Enjeux, défis et stratégies. In Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua (pp. 6-p). Cirad.
- Kchouk S., Braiki H., Habaieb H., Burte J. 2015.** Les bas-fonds de la plaine de Kairouan: de terres marginalisées à lieux d'expérimentation agricole. Cahiers Agricultures, 24(6), 404-411.
- Labidi O., 2019.** Bilan hydrique des oasis des gouvernorats de Kébili, Tozeur, Gafsa et Gabès. Projet d'Ecotourisme et de la biodiversité désertique (P120561; Don FEM No. TF013636), Ministère des affaires locales et de l'environnement, Gef, Banque Mondiale
- Liu R., Sogachev A., Yang X., Liu S., Xu T., Zhang J. 2020.** Investigating microclimate effects in an oasis-desert interaction zone. Agricultural and Forest Meteorology, 290, 107992.
- Maillard T. 2018.** Cartographie participative (brochure aux étudiants) (Doctoral dissertation, Université Paris 8 Vincennes Saint-Denis).
- Masmoudi N., 2000.** Essai de production de biomasse « *Saccharomyces cerevisiae* » à partir des dattes "Ghars". Mémoire d'Ingénieur. Département d'agronomie. Batna.52 p.
- Mekki I., Marlet S., Ghazouani W., Fusillier J. L., Ammami H., Le Gal P. Y. 2009.** L'oasis de Fatnassa Nord sous contraintes environnementale, socioéconomique et d'organisation de la filière dattes: éléments de diagnostic de son fonctionnement. Proceedings of the Sociétés en Transition et Développement Local en Zones Difficiles, Djerba, Tunis, 22-24.
- Mekki I., Ferchichi I., Taoujouti, N., Faysse N., Zaïri A. A. 2021.** Analyse de l'extension des palmeraies oasiennes et de son impact sur les ressources en eau souterraine dans la région de Kébili, sud-ouest de la Tunisie.
- Omrani N., & Ouessar M. 2010.** Technical perspectives of irrigation efficiency improvement in the oasis systems-cases of southern Tunisia.
- Pellemans P., 1999.** Recherche qualitative en marketing, Ed DeBoeck Université, Paris, 86.

- Potchter O., Goldman D., Kadish D., Iluz D. 2008.** The oasis effect in an extremely hot and arid climate: The case of southern Israel. *Journal of Arid Environments*, 72(9), 1721-1733.
- Santoro A., Venturi M., Ben Maachia S., Benyahia F., Corrieri F., Piras F., Agnoletti M. 2020.** Agroforestry heritage systems as agrobiodiversity hotspots. The case of the mountain oases of Tunisia. *Sustainability*, 12(10), 4054.
- Sedra, M. H., 2003.** Le palmier dattier base de la mise en valeur des oasis au Maroc: techniques phoéniciques et création d'oasis. INRA Editions.
- Sellami M. H., 2008.** A scientific guide for agricultural water management and biodiversity conservation inside the North African oasis. *Agricultural Water Management Research Trends*, 171, 212.
- Sghaier M. 2010.** Etude de la gouvernance des ressources naturelles dans les oasis, Cas des oasis en Tunisie. *Union Internationale pour la Conservation de la Nature*, 69, 25-26.
- Sghaier, M. 2014.** Perspectives de développement de l'approche filière pour la structuration des activités des communautés locales au niveau des oasis de la région MENA. *Projet MENA-DELP Partage des connaissances et de coordination sur les écosystèmes désertiques et les moyens de subsistance.*
- Shaltout, A. D., & Unrath, C. R. 1983.** Rest completion prediction model for 'Starkrimson Delicious' apples. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 108(6), 957-961.
- Zammouri M., Siegfried T., El-Fahem T., Kriâa S., & Kinzelbach W. 2007.** Salinization of groundwater in the Nefzawa oases region, Tunisia: results of a regional-scale hydrogeologic approach. *Hydrogeology Journal*, 15, 1357-1375.
- Zhang, J., & Taylor, C. 2011.** The dynamic model provides the best description of the chill process on 'Sirora' pistachio trees in Australia. *HortScience*, 46(3), 420-425.

Rapports

CDCGE., 2015. Projet « Elaboration D'une Monographie Complete Des Oasis En Tunisie »

Document 2, Identification Et Caracterisation Des Oasis En Tunisie

GIZ., 2012. Les oasis de Tunisie à protéger contre la dégradation et les effets du changement climatique. République Tunisienne Ministère de l'Environnement, Tunis, Tunisia.

Programme des Nations unies pour le développement.1996. *Rapport mondial sur le développement humain 1996.*

Annexe 1

Tableau 1 : Les mesures de l'humidité du sol au sein des 4 oasis.

Oasis	Tour d'eau (en jour)	Début irrigation (en heure)	Stock initial (en mm)	Stock final (en mm)	Stock accumulé (en mm)	Durée du retour au stock initial (en jour)	
1ere parcelle Barghouthia (1 étage)	Moyenne	8.5	13:08:33	75.60	255.56	179.96	6
	Maximum	36.0	23:22:00	147.49	295.71	254.85	34
	Minimum	2.0	00:36:00	32.39	160.26	76.83	1
2eme parcelle Barghouthia (3 étages)	Moyenne	10.1	12:38:12	90.86	248.99	158.13	4
	Maximum	53.0	23:58:00	150.71	280.10	249.43	23
	Minimum	1.0	03:03:00	25.80	202.96	55.18	1
1ere parcelle el Kaabi (1 étage)	Moyenne	14.8	11:13:07	196.49	290.71	94.22	8
	Maximum	68.0	21:30:00	284.39	365.37	213.78	54
	Minimum	2.0	02:00:00	113.72	134.62	15.63	1
2eme parcelle el Kaabi (1 étage)	Moyenne	12.5	15:31:26	107.94	303.42	193.94	6
	Maximum	46.0	21:00:00	198.05	352.53	290.26	22
	Minimum	1.0	02:00:00	54.38	226.20	100.88	1

Annexe 2

Date	Personne enquêtée	Lieu	N° enquête

Grille de questions

(En mode discussion) Pour créer un lien de confiance, dégager les informations suivantes : niveau d'instruction/ situation familiale (main d'œuvre familiale ...)/ Depuis quand il est un agriculteur (pour savoir s'il a une idée sur l'histoire de la région...)

Parcelle :

Cette parcelle vous appartient elle ou bien vous êtes locataire ? Depuis quand ?

Si c'est un héritage, il y a d'autres héritiers ? Où sont-ils ? (morcellement des terres)

Quelle est la superficie de la parcelle ?

Quelle est le type de la spéculation (Nombre d'étages présents)

Avez-vous observé des phénomènes d'érosion hydrique ou éolienne ?

Climat :

Pourriez-vous me parler de l'histoire de la région ?

Avez-vous une idée sur les changements climatiques ? Comment les avez-vous perçus ?

Comment avez-vous remarqué ces changements ? Comment était-ce avant ?

Eau- irrigation :

Faites vous partie d'un GDA étatique ou privé ?

Quelle est la source de votre eau ? Que pensez-vous de cette qualité ? Pourquoi ?

Comment jugez-vous la disponibilité de l'eau ?

Avez-vous d'autres sources d'eau ?

Avez-vous mis en place un programme d'irrigation ?

Quelle est la durée de tour d'eau ?

A quelle fréquence vous irriguez ? Est-ce que cette fréquence est imposée ?

Quelle est la durée d'irrigation ? Quelle est la raison derrière ce choix ? Et quelle est la dose appliquée ? Pensez- Vous que les quantités appliquées sont suffisante ou en excès ? Comment faites vous pendant les périodes de sécheresse ?

Est-ce que vous prenez en compte des besoins de vos cultures ?

Quel est le type de votre irrigation ?

Connaissez-vous le taux de salinité de l'eau de l'irrigation ?

A quel prix vous payez le m³d'eau ?

Quelle était la fréquence d'irrigation avant ?

Y a-t-il un système de drainage ? Si oui, Naturel ou artificiel ?

Existe-t-il une différence entre l'irrigation d'une oasis à un seul étage et une oasis à trois étages ? Si oui Comment ?

Pourquoi les irrigations ne suivent pas les stades de développement de vos cultures ?

Production Végétale :

Quelle est le nombre de pieds / densité de plantation de votre parcelle ?

Quelle sont les cultures présentes dans votre parcelle ? Et quelles variétés ? Pourquoi ce choix ?

D'où obtenez-vous vos plants ou vos semences ?

Quelle sont les variétés de palmier dattier présents ? Quelle est la destination de votre production ?

Quel est le destin du reste de la culture ?

Pourquoi avez-vous choisi ces cultures ?

Avez-vous changé de type de cultures ou changé vos pratiques culturelles pendant ces dernières années ? Si oui comment et quelles sont les raisons ?

Quelles sont vos pratiques culturelles ?

Quels est le rendement à l'ha de ces cultures ?

Avez-vous un couvert végétal permanent ?

Avez-vous remarqué la présence de maladies ou de symptômes de maladies ?

Si oui quelles sont ces symptômes ?

Avez-vous observé des changements au sein de votre parcelle récemment ?

Sol :

Quel est le type de votre sol ? Comment évaluez-vous la qualité de votre sol ? Quels sont vos critères ?

Comment jugez-vous l'absorption de l'eau par le sol ? (signes de dégradation, compaction)

S'il y a une dégradation, depuis quand et quelle sont les signes ?

Ajoutez-vous de la matière organique ou des engrais chimiques (minéraux) ? Si oui durant quelle période, avec quelle fréquence, et avec quelle dose ?

Avez-vous rencontré un problème de salinisation de votre sol ou le phénomène de la remontée de la nappe ? Si oui comment ? A-t-il posé des problèmes ? Avez-vous des solutions que vous pratiquez ?

Aptitude au changement :

Êtes-vous prêt à changer vos pratiques culturelles afin d'améliorer certains aspects de votre production ?

Êtes-vous prêt à changer vos pratiques et diminuer les doses appliquées et diminuer la durée du tour d'eau pour améliorer l'efficacité d'utilisation d'eau ?